

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG GASFACHLICHE  
WEITERBILDUNG DVGW-PRÜFSTELLE UND SACH-  
VERSTÄNDIGENSTELLE FÜR DIE INDUSTRIELLE GAS-  
VERWENDUNG



RUNKEL PLANT, BAUT UND LIEFERT ERDGASBEHEIZTE  
ANLAGEN (LUNTEN- UND ANWÄRMSYSTEME SOWIE BE-  
HEIZUNGSANLAGEN) FÜR INDUSTRIE UND GEWERBE

## **Abschlussbericht**

der Forschungsstelle  
Gas- und Wärme-Institut Essen e. V.  
und  
der Firma  
Runkel GmbH & Co. KG

zu dem über das  
Zentrale Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM)  
geförderte Projekt vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie  
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages  
Vorhabensnummer: **KF3016101ST2 und KF2517704ST2**

**„Innovative Nano-Beschichtung von Abgaswärmetauschern zur Steigerung  
der Effizienz und Lebensdauer“**

(Bewilligungszeitraum: 01.08.2012 - 30.04.2014)

## Inhaltsverzeichnis

|                                                                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Inhaltsverzeichnis.....                                                                                                                                                  | 2  |
| 1. Zusammenfassung .....                                                                                                                                                 | 3  |
| 2. Wichtigste wissenschaftlich-technische und andere wesentliche Ergebnisse.....                                                                                         | 4  |
| 2.1 Messtechnische Erfassung des originalen Wärmetauschers .....                                                                                                         | 5  |
| 2.2 Analyse der Ablagerungen.....                                                                                                                                        | 15 |
| 2.3 Analyse der Gaszusammensetzung .....                                                                                                                                 | 20 |
| 2.4 Metallografische Untersuchung .....                                                                                                                                  | 21 |
| 2.5 Analyse der Geometrie des originalen Wärmetauscher .....                                                                                                             | 24 |
| 2.6 Simulation von Alternativvarianten.....                                                                                                                              | 31 |
| 2.7 Nanotechnologie .....                                                                                                                                                | 33 |
| 2.7.1 Beschichtungsvariationen neuer Wärmetauscher.....                                                                                                                  | 34 |
| 2.7.2 Gesundheitsrisikogruppen .....                                                                                                                                     | 35 |
| 2.8 Neuauslegungsvorschlag Wärmetauschergeometrie .....                                                                                                                  | 37 |
| 2.9 Spezifikation der Geometrie am GWI für die Langzeittest.....                                                                                                         | 39 |
| 2.9.1 Ergebnisse des neuen Wärmetauscher am Versuchstand des GWI .....                                                                                                   | 39 |
| 2.9.2 Aufbau Langzeittest beim Kunden .....                                                                                                                              | 42 |
| 2.9.3 Ergebnisse Langzeittest .....                                                                                                                                      | 43 |
| 2.9.4 Designkriterien .....                                                                                                                                              | 46 |
| 3. Haben sich die Aussichten für die Erreichung der Projektziele oder die Zielsetzungen innerhalb des angegebenen Berichtszeitraums gegenüber dem Antrag geändert? ..... | 48 |
| 4. Anpassung des Projektzieles und des Arbeitsplanes .....                                                                                                               | 49 |
| 5. Gegenüberstellung von Forschungszielen und erzielten Ergebnissen .....                                                                                                | 51 |
| 6. Nutzen der Forschungsergebnisse und Marktchancen .....                                                                                                                | 52 |
| 6.1 Auswirkungen auf das Unternehmen Runkel.....                                                                                                                         | 52 |
| 6.2 Marktchancen für den neuen Wärmeübertrager .....                                                                                                                     | 53 |
| 7. Danksagung.....                                                                                                                                                       | 54 |
| 8. Abbildungsverzeichnis .....                                                                                                                                           | 55 |
| 9. Tabellenverzeichnis.....                                                                                                                                              | 57 |

## **1. Zusammenfassung**

Für thermische Prozessanlagen der Industrie können in einem technischen Verfahren durch Kopplung eines Strahlrohrbrenners mit einem Abgaswärmetauscher aus Edelstahl, Energiepotenziale aus der Abwärme zugänglich gemacht werden, indem sie dem Produktionsprozess an anderer Stelle wieder zugeführt werden. Somit werden Energiekosten und der CO<sub>2</sub>-Ausstoß gesenkt. Bei der Wärmerückgewinnung kommt es bei einigen Anwendungen zu einem Problem, der Abgaswärmetauscher verschmutzt und korrodiert. Eine Wärmerückgewinnung in dieser Form ist dann nicht mehr effektiv. Daher müssen neue Lösungsansätze gefunden werden, dies zu verhindern. Ziel dieses Projektes ist es, die Verschmutzung und Korrosion durch gezielte Maßnahmen zu vermeiden. Hierbei müssen Hintergründe, die zur Verschmutzung führen, weiter analysiert und Strategien zur Verhinderung der Verschmutzung und Korrosion entwickelt werden. Für Edelstahl bietet sich eine SiO<sub>2</sub>-Oberflächenversiegelung im Nanometerbereich an, die aufgrund der schmutzabweisenden und säurebeständigen Versiegelung einen innovativen Lösungsansatz bildet. Durch die Oberflächenbeschichtung können die Lebensdauer des Bauteils verlängert, Ressourcen geschont und effizienter eingesetzt werden.

## 2. Wichtigste wissenschaftlich-technische und andere wesentliche Ergebnisse

Ziel dieses Projektes ist es, die Verschmutzung und Korrosion von Abgaswärmetauschern aus Edelstahl durch gezielte Maßnahmen zu vermeiden und die Effektivität der Wärmerückgewinnung über die Einsatzlebensdauer zu erhalten. Hierbei müssen Hintergründe, die zur Verschmutzung führen, weiter analysiert und Lösungsansätze und Strategien zur Verhinderung der Verschmutzung und Korrosion entwickelt werden.

Nachfolgend ist der Zeitplan laut Vorhabenbeschreibung dargestellt:

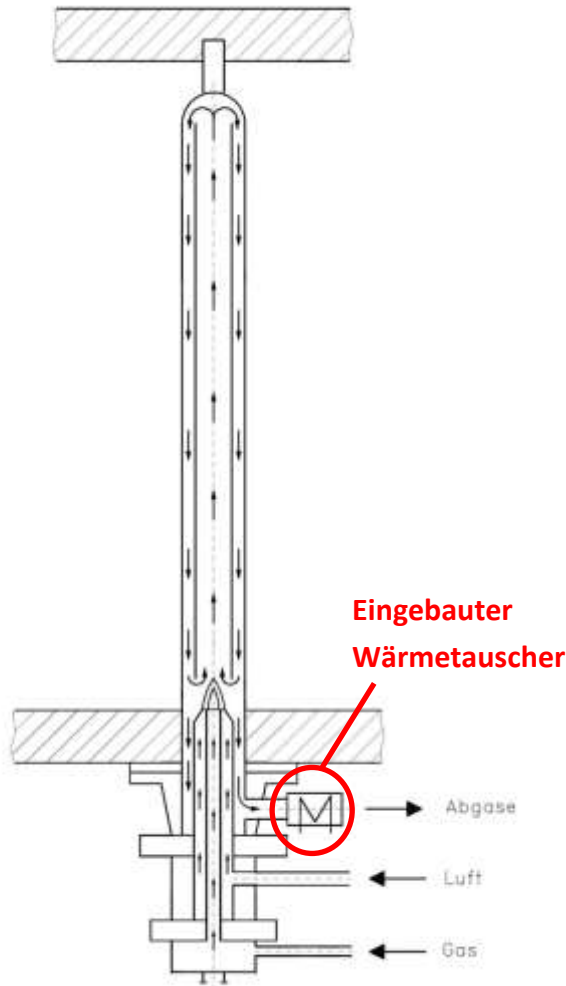
| Arbeitsschritte |                                               | 1.Jahr |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 2.Jahr |    |    |    |    |    |
|-----------------|-----------------------------------------------|--------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|--------|----|----|----|----|----|
|                 |                                               | 1      | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13     | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| 1.1             | Messtechnische Erfassung                      | ★      |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |        |    |    |    |    |    |
| 1.2             | Analyse der Ablagerungen                      |        |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |        |    |    |    |    |    |
| 1.3             | Analyse der Gaszusammensetzung                |        |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |        |    |    |    |    |    |
| 2.1             | Analyse der Geometrie                         |        |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |        |    |    |    |    |    |
| 2.2             | Simulation von Alternativvarianten            |        |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |        |    |    |    |    |    |
| 2.3             | Nanotechnologie                               |        |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |        |    |    |    |    |    |
| 2.4             | Spezifikation der Geometrievariation          |        |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |        |    |    |    |    |    |
| 3.1             | Variation und Optimierung der Geometrie       |        |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |        |    |    |    |    |    |
| 3.2             | Variation der Parameter der Nano-Beschichtung |        |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |        |    |    |    |    |    |
| 3.3             | Langzeittest/Feldtest                         |        |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |        |    |    |    |    |    |
| 3.4             | Analyse der Messdaten                         |        |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |        |    |    |    |    |    |
| 4.1             | Auswertung der Tests                          |        |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |        |    |    |    |    |    |
| 4.2             | Aufstellen von Designkriterien                |        |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |        |    |    |    |    |    |
| 4.3             | Erstellung der Dokumentation                  |        |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |        |    |    |    |    |    |

- ★ geplante Meetings
- ★ Kick-off-Meeting
- ★ Zwischenmeetings
- ★ Abschlussmeeting

Abbildung 2-1: Projektzeitplan bei Antragsstellung

## 2.1 Messtechnische Erfassung des originalen Wärmetauschers

Die **Abbildung 2-2** zeigt das Prinzip eines Strahlheizrohrbrenners und die Installation des eingesetzten Wärmetauschers (WT) am Abgasanschluss des Brenners, siehe **Abbildung 2-3**.



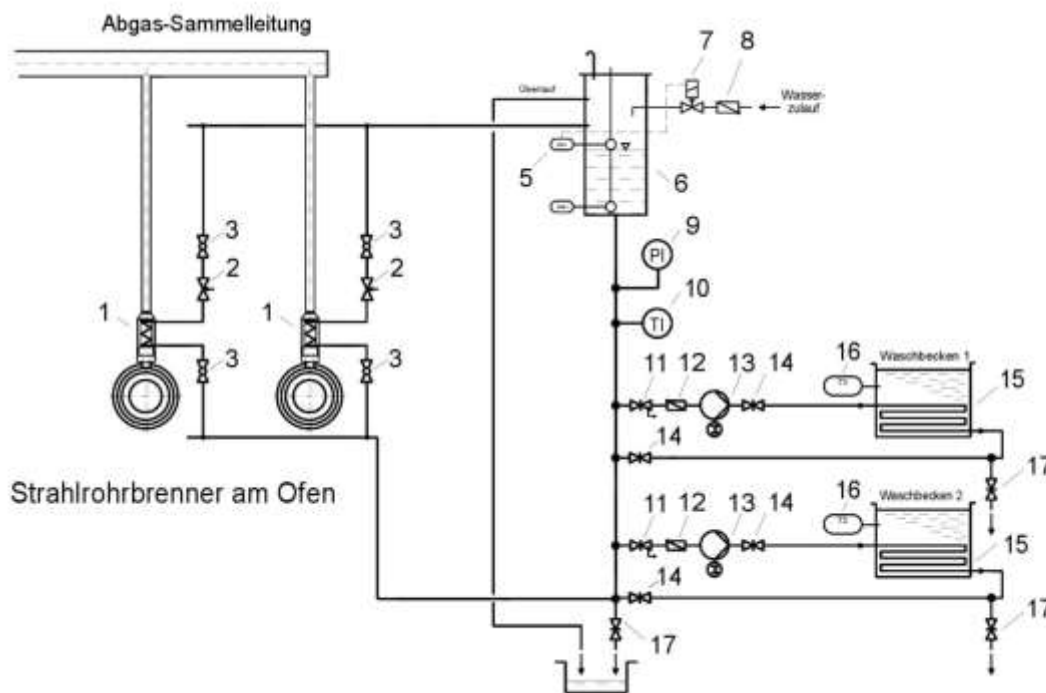
**Abbildung 2-2:** Prinzip Strahlheizrohrbrenner

**Abbildung 2-3:** Wärmetauscher

Der Wärmetauscher wird zur weiteren Rückgewinnung von Wärme aus dem Abgas von Strahlheizrohrbrennern eingesetzt. Den Aufbau einer beispielhaften Abgaswärmerückgewinnungsanlage an Strahlheizrohrbrennern zeigt das R + I-Schema in der **Abbildung 2-4**. Die eingesetzten Wärmetauscher sind in dem R + I-Schema mit der Nummer 1 gekennzeichnet. Die Betriebsweise des Abgas-Wärmetauschers in einfacher oder doppelter Ausführung erfolgt im Gleichstromprinzip, d. h., die Abgase des Strahlheizrohrbrenners werden aus dem 2“ Anschlussstutzen des Gasbrenners in den Wärmetauscher von unten nach oben geleitet. Der zu erwärmende Wasserstrom wird am unteren Stutzen eingeleitet und am oberen Anschlussstutzen entnommen.

Die Wärmetauscher befinden sich solange im Dauerbetrieb, wie die Strahlheizrohrbrenner eingeschaltet sind. Sie können/sollten nicht abgesperrt werden, da sonst eine Überhitzung auftritt.

Das Außengehäuse und der Stutzen des Wärmetauschers bestehen aus V2A Stahl, 1.4301, X5CrNi18-10, Austenit. Der Boden und die Winglet Kanäle bestehen aus V4A Stahl, 1.4404, X5CrNiMo17-12-2, Austenit. Für die Zusammenführung zweier Wärmetauscher wird am Stutzen der Wärmetauscher eine Halterung aus einem Rechteckrohr befestigt. Das Material der Halterung besteht aus V2A Stahl, 1.4301, X5CrNi18-10, Austenit.



**Abbildung 2-4:** R + I-Schema einer Abgaswärmerückgewinnungsanlage an Strahlheizrohrbrennern

**Legende zu Abbildung 2-4:**

- |                                                  |                                  |
|--------------------------------------------------|----------------------------------|
| 1 - Abgaswärmetauscher;                          | 10 - Temperaturfühler;           |
| 2 - Regulierhahn;                                | 11 - Absperrhahn mit Entleerung; |
| 3 - Absperrhahn;                                 | 12 Rücktrittsicherung;           |
| 5 - Schwimmerschalter;                           | 13 - Umwälzpumpe;                |
| 6 - Ausgleichsbehälter mit Einspeisevorrichtung; | 14 - Absperrhahn;                |
| 7 - Wassermagnetventil;                          | 15 - Heizschlange;               |
| 8 - Rückflussverhinderer;                        | 16 - Doppelkesselthermostat;     |
| 9 - Manometer;                                   | 17 - Entleerungshahn;            |

Die folgenden Daten wurden von der Firma Runkel als Auslegungsparameter für den Wärmetauscher angesetzt:

---

|                                            |                                    |
|--------------------------------------------|------------------------------------|
| Brennerleistung des Strahlheizrohbrenners: | 35 kW                              |
| Abgasvolumenstrom:                         | 44 m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /h  |
| Abgas-Temperatur am Eingang des WT:        | 350 - 600 °C                       |
| Abgas-Temperatur am Ausgang des WT:        | > 120 °C                           |
| Wasserszusammensetzung:                    | 80 % Wasser / 20 % Ethylenglykol   |
| Wasservolumenstrom:                        | 0,25 - 1 m <sup>3</sup> /h         |
| Wasser-Eintritts-Temperatur am WT:         | 70 °C                              |
| Wasser-Austritts-Temperatur am WT:         | 90 °C (T <sub>max.</sub> = 110 °C) |

---

Auf Grund rechtlicher Probleme und laufender Genehmigungsverfahren beim Anlagenbetreiber, der diese Wärmetauscher einsetzt, war es den Projektpartnern zu Beginn des Projektes nicht möglich, die komplette messtechnische Erfassung des IST-Zustandes der zurzeit eingebauten unbeschichteten Wärmetauscher im realen Betrieb, wie im Arbeitsplan vorgesehen, durchzuführen.

Deshalb haben die Projektpartner beschlossen, dass am GWI ein kompletter experimenteller Versuchsstand aufgebaut wird. Dieser soll mit den Randbedingungen des realen Einsatzfalles betrieben werden, um einerseits Vergleichsdaten für die späteren Simulationen zu haben und andererseits einen Eindruck von der tatsächlichen Einbausituation zu erhalten. Dabei sollen die Temperaturen des Abgases und des Wassers am Ein- und Austritt sowie die jeweiligen Volumenströme erfasst werden. Durch Variation der Einbausituation des Wärmetauschers soll eine Lösung gefunden werden, die im Hinblick auf Belastung und Wirkungsgrad am sinnvollsten ist.

Das Anlagenschema des Versuchsaufbaus ist auf der nächsten Seite in **Abbildung 2-5** dargestellt.





Ein Bild des realisierten messtechnischen Versuchsaufbaus am GWI zeigt die folgende **Abbildung 2-6**.

**Wärmeübertrager**



**Abbildung 2-6:** Versuchsstands Aufbau am GWI

Für die Versuchsdurchführung sind einige Randbedingungen vorgegeben, aus denen weitere notwendige Parameter berechnet werden müssen. Der Wärmetauscher wird in doppelter Ausführung an den Strahlheizrohrbrennern mit einer Leistung von bis zu 35 kW eingesetzt. Aus dem realen Anwendungsfall sind die Eintrittstemperaturen vom Abgas und vom Wasser bekannt sowie die Luftzahl der Verbrennung. Aus der Luftzahl von  $\lambda = 1,15$  und der Leistung von  $P = 35 \text{ kW}$  kann damit der Abgasmassenstrom berechnet werden.

Aus der Summe des Brenngasmassenstroms und des Verbrennungsluftmassenstroms ergibt sich ein Gesamtmassenstrom.

**Abbildung 2-7** veranschaulicht die Unterschiede des Volumenstroms im Betriebszustand und im Normzustand im Vergleich zum Massenstrom bei steigender Leistung. Dazu zeigt die Kur-

ve des Massenstroms eine annähernde Steigung zum Volumenstrom im Normzustand auf. Der gewünschte Massenstrom wird im Versuchsbetrieb über den Volumenstrom reguliert. Aus dem Massenstrom von  $\dot{m}_{\text{Luft}} = 52,5 \text{ kg/h}$  und der Dichte für Luft bei  $20 \text{ °C}$   $\rho_{\text{Luft}} = 1,1881 \text{ kg/m}^3$  ergibt sich so ein einzustellender Normvolumenstrom von  $\dot{V}_{\text{Luft}} = 44,19 \text{ m}_N^3/\text{h}$ . Daraus ergibt sich nach dem Lufterhitzer ein Volumenstrom am Wärmetauscher von  $\dot{V}_{\text{Luft}} = 109,15 \text{ m}^3/\text{h}$ .

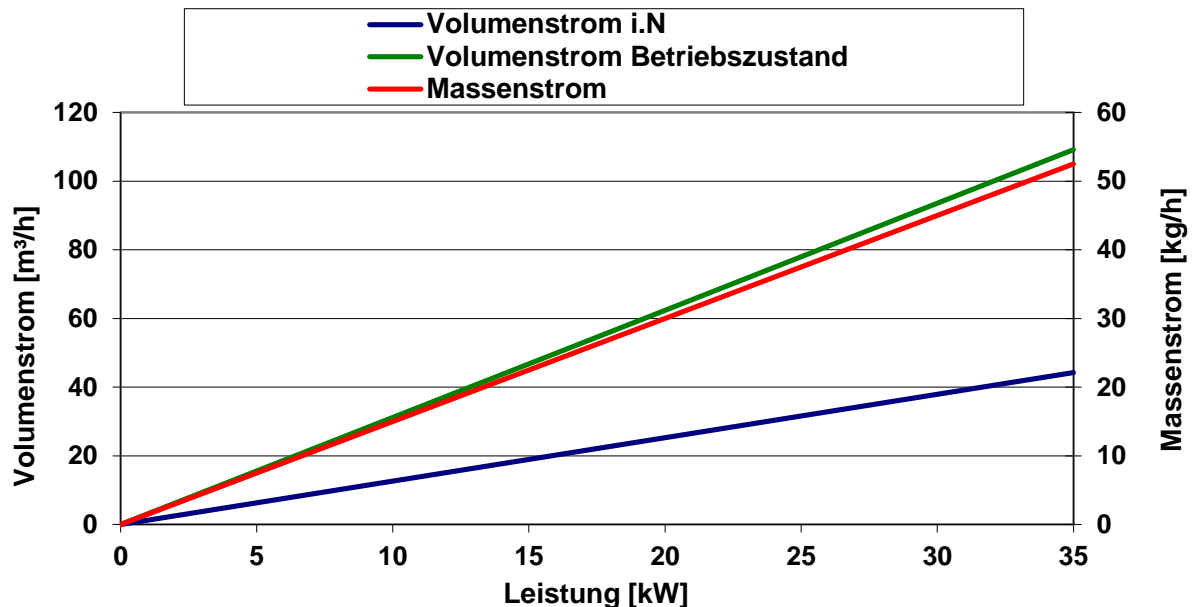
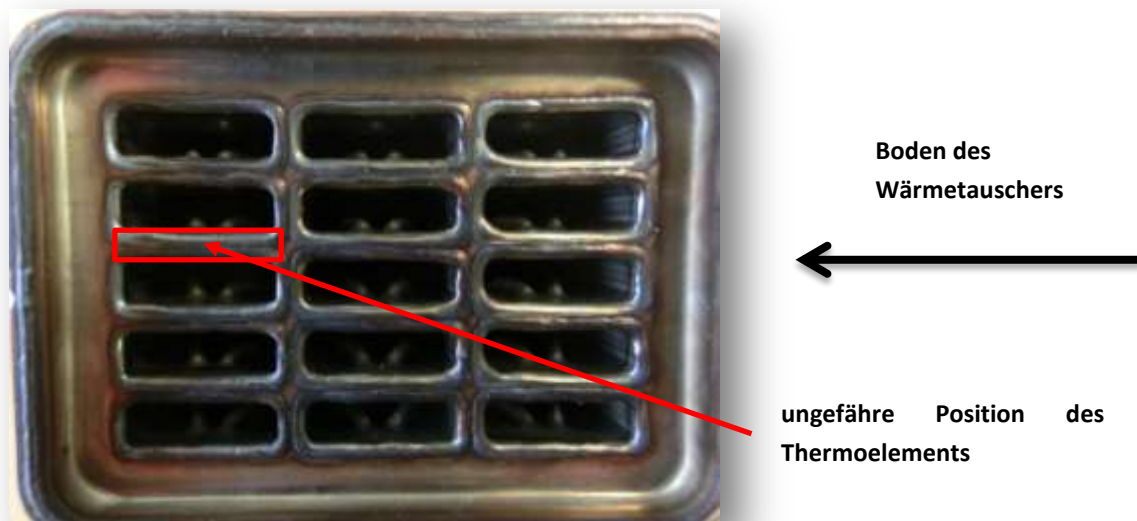


Abbildung 2-7: Massen- und Volumenstrom in Abhängigkeit der Brennerleistung

Das zu erwärmende Wasser tritt mit einer Temperatur von  $80 \text{ °C}$  und einem Volumenstrom von  $9,4 \text{ l/min}$  in den Wärmetauscher ein. Am Ausgang des Wärmeübertragers, den das Wasser im Gleichstrom durchläuft, wird eine Temperaturdifferenz von  $\Delta\vartheta = 5 \text{ K}$  erwartet. Das Abgas bzw. die heiße Luft besitzt eine Temperatur von  $450 \text{ °C}$ .

Zur Erfassung der Temperaturen wird der Wärmetauscher wasserseitig am Ein- und Austritt angebohrt und mit Schraubverschlüssen für Thermoelemente mit einer Stärke von  $1 \text{ mm}$  versehen. Besonders von Interesse ist die Temperatur des Wassers an der Stirnseite des Wärmeübertragers, da es hier zur Zerstörung des Materials kommt. Dazu wird ein Thermoelement über den Wassereintritt in den Wärmeübertrager eingeführt und mit Hilfe eines Endoskops an der Stelle positioniert, an der erhöhte Wassertemperaturen erwartet werden. Die genaue Position ist in **Abbildung 2-8** markiert.

Um aussagekräftige Ergebnisse über das Verhalten des Wärmeübertragers bei verschiedenen Einbauvarianten und Randbedingungen zu erhalten, die anschließend mit den Erkenntnissen aus den CFD-Simulationen verglichen werden, werden verschiedene Messpunkte angefahren. Vier unterschiedliche Einbauvarianten werden jeweils bei der maximalen Brennerleistung von  $P = 35 \text{ kW}$  erprobt. Darüber hinaus wird über die Absaugung ein Unterdruck erzeugt, der die Abgasabsaugung über der Abgasanlage simulieren soll und für jede Variante variiert wird. Es werden Messungen bei  $0 \text{ Pa}$ ,  $-30 \text{ Pa}$  und  $-50 \text{ Pa}$  Druck im Kamin aufgenommen.



**Abbildung 2-8:** Position des Thermoelements an der Stirnseite des WT

**Abbildung 2-9** zeigt auf der nächsten Seite Prinzipskizzen der Varianten 1 bis 4.

#### **Variante 1**

Variante 1 entspricht dem Ursprungszustand. Das heißt, unterhalb des Wärmetauschers befindet sich ein Zugunterbrecher und das Abgas wird nicht vollständig durch den Wärmetauscher geführt. Ein Teil des Abgases strömt sowohl zwischen Wärmetauscher und Gehäuse entlang als auch frei in die Umgebung. Dadurch gelangt auch Umgebungsluft in den Wärmetauscher.

#### **Variante 2**

Variante 2 beschreibt die Situation, in der das Abgas durch den Wärmetauscher geführt wird. Dazu werden die Seiten geschlossen, sodass kein Abgas zwischen Wärmetauscher und Gehäuse gelangen kann. Variante 2 erhält wieder einen Zugunterbrecher, wodurch sowohl Abgas in die Umgebung als auch Luft in den Wärmetauscher strömen kann.

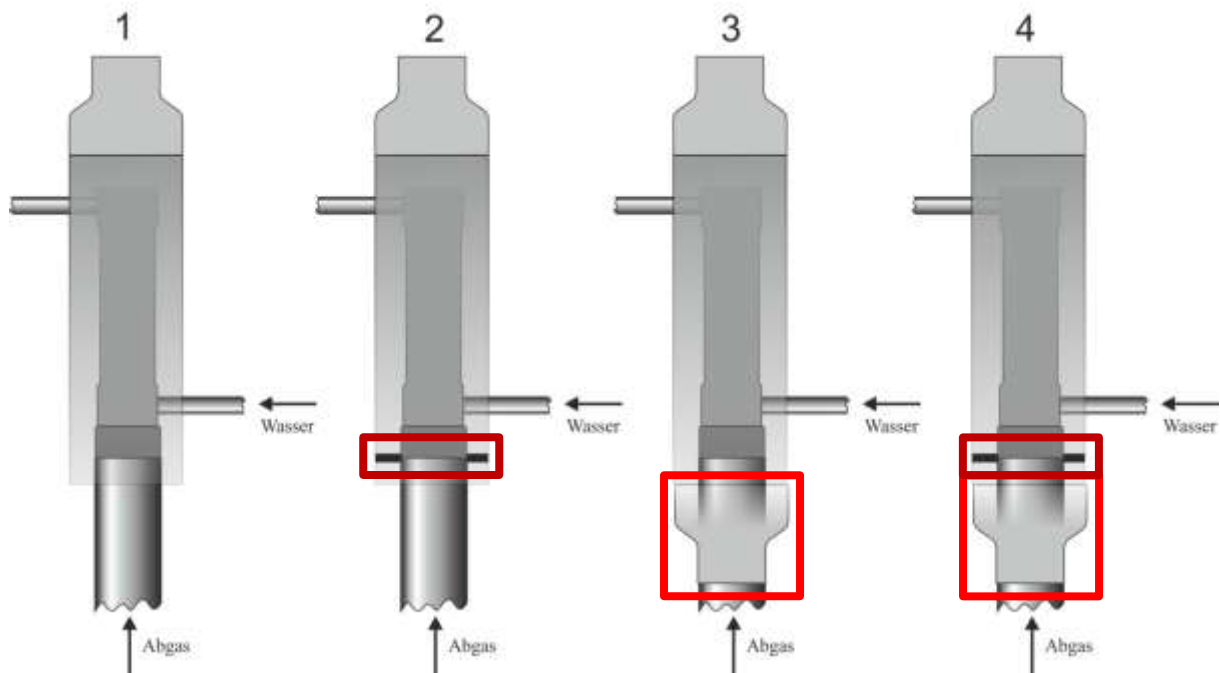
#### **Variante 3**

Bei Variante 3 wird das Gehäuse unten geschlossen (kein Zugunterbrecher), sodass keine Umgebungsluft eintritt und kein Abgas in die Umgebung strömt. Für diese Variante wird theoretisch keine Absaugung benötigt. Um einen gewissen Druckverlust zu überwinden, kann der Versuch dieser Variante jedoch auch um Versuche mit Absaugung ergänzt werden.

#### **Variante 4**

Bei Variante 4 werden sowohl die Seiten geschlossen als auch das Gehäuse, sodass keine Umgebungsluft eintreten kann und das Abgas vollständig durch den Wärmetauscher geleitet wird (Zwangsführung).

Bei Variante 4 sind die höchsten Temperaturen auf der Wasserseite zu erwarten.



**Abbildung 2-9:** Prinzipzeichnung der Einbauvarianten 1-4, in Rot die jeweiligen Änderungen

Um den Einfluss der Absaugung auf die Wärmeübertragung zu untersuchen, werden die verschiedenen Varianten bei den oben genannten Unterdrücken im Kamin vermessen.

Die Versuchsergebnisse sind Mittelwerte von 50 aufeinanderfolgenden Messungen, welche, nachdem sich ein Beharrungszustand ergeben hat, erfasst wurden.

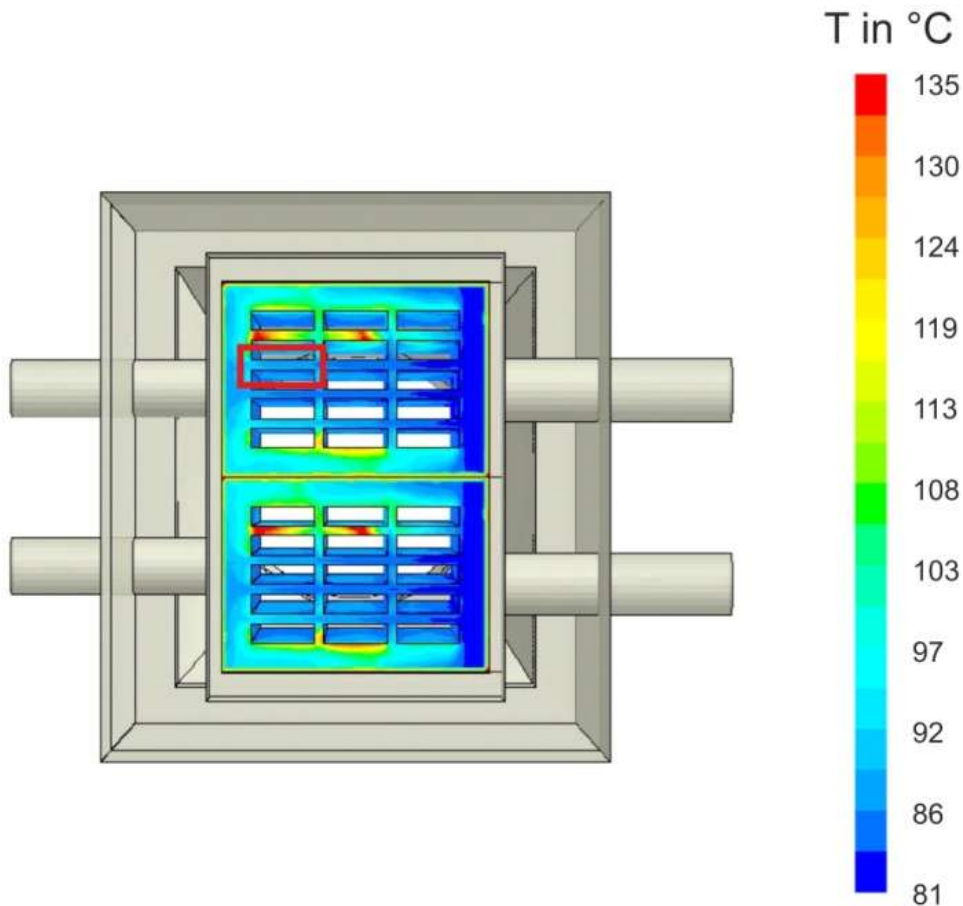
Für den Ursprungszustand (Variante 1) des Wärmeübertragers ergeben sich bei der Messung mit einem Luftmassenstrom von  $\dot{m}_{\text{Luft}} = 52,5 \text{ kg/h}$  und einem Wasservolumenstrom von  $\dot{V}_{\text{Wasser}} = 564 \text{ l/h}$  folgende Ergebnisse dargestellt in **Tabelle 2-1**:

**Tabelle 2-1:** Messergebnisse Variante 1

| $p_{\text{Luft,aus}}$<br>[Pa] | $T_{\text{Luft,ein}}$<br>[°C] | $T_{\text{Luft,aus}}$<br>[°C] | $T_{\text{Wasser,ein}}$<br>[°C] | $T_{\text{Wasser,aus}}$<br>[°C] | $\Delta\dot{Q}_{\text{Wasser}}$<br>[W] | $T_{\text{Wasser,Stirnseite}}$<br>[°C] |
|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| 0                             | 450                           | 114                           | 79,4                            | 84,3                            | 3068                                   | 88,7                                   |
| -30                           | 450                           | 135                           | 79,2                            | 84,9                            | 3607                                   | 89,3                                   |
| -50                           | 450                           | 144                           | 79,0                            | 84,9                            | 3775                                   | 89,5                                   |

Die aufgenommene Wärmemenge des Wassers wird mit einer spez. Wärmekapazität bei 80 °C von 4196 J/kg\*K berechnet. Durch die Erhöhung des Unterdrucks im Kamin steigt die aufgenommene Wärmemenge des Wassers. Die erforderliche Temperaturerhöhung von 5 K wird dabei in allen Fällen erfüllt. Die Durchschnittstemperatur des Wassers an der Stirnseite des Wärmeübertragers beträgt jeweils ca. 90 °C. Obwohl dieser Wert unter der Siedetemperatur des Wassers liegt, ist er aus den folgenden zwei Gründen alarmierend. Erstens kommt es während des Betriebs des Wärmeübertragers zu starken Schwankungen um diesen Wert, sodass auch Temperaturen über 100 °C erfasst wurden. Zweitens befindet sich das Thermoelement, das diese Werte aufnimmt, nicht an der kritischen Stelle für die Extremtemperatu-

ren, welche bei den Simulationen ausgemacht wurden (Details siehe **Kapitel 2.5**). **Abbildung 2-10** zeigt beispielhaft die kritischen Stellen des Wassers an der Stirnseite des WT. In der Abbildung ist zusätzlich die Stelle des Thermoelements markiert (rotes Rechteck). Das Thermoelement befindet sich in einem Bereich, in dem es durch den erhöhten Austausch mit Frischwasser zu niedrigeren Temperaturen kommt, im Gegensatz zum Bereich daneben.



**Abbildung 2-10:** Simulierte Temperaturverteilung des Wassers an der Stirnseite des WT

Für Variante 2, bei der die Seiten zwischen Gehäuse und Wärmeübertrager geschlossen sind, ergeben sich bei der Messung folgende Ergebnisse wiedergegeben in **Tabelle 2-2**.

**Tabelle 2-2:** Messergebnisse Variante 2

| $p_{Luft,aus}$<br>[Pa] | $T_{Luft,ein}$<br>[°C] | $T_{Luft,aus}$<br>[°C] | $T_{Wasser,ein}$<br>[°C] | $T_{Wasser,aus}$<br>[°C] | $\Delta\dot{Q}_{Wasser}$<br>[W] | $T_{Wasser,Stirnseite}$<br>[°C] |
|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 0                      | 450                    | 137                    | 80,2                     | 85,0                     | 3108                            | 90,8                            |
| -30                    | 450                    | 143                    | 80,4                     | 86,3                     | 3760                            | 92,8                            |
| -50                    | 450                    | 147                    | 80,4                     | 86,8                     | 4059                            | 91,4                            |

Durch das Schließen des Zwischenraumes zwischen WT und Gehäuse steigt die Wärmeübertragung in geringen Maß. Die kritische Temperatur an der Stirnseite steigt ebenfalls und dadurch auch die Gefahr von verdampfendem Wasser.

Für die Varianten 3 und 4, die ohne eine Absaugung gemessen wurden, ergeben sich folgende Ergebnisse, welche in den **Tabelle 2-3** und **Tabelle 2-4** wiedergegeben werden:

**Tabelle 2-3:** Messergebnisse Variante 3

| $p_{Luft,aus}$<br>[Pa] | $T_{Luft,ein}$<br>[°C] | $T_{Luft,aus}$<br>[°C] | $T_{Wasser,ein}$<br>[°C] | $T_{Wasser,aus}$<br>[°C] | $\Delta\dot{Q}_{Wasser}$<br>[W] | $T_{Wasser,Stirnseite}$<br>[°C] |
|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 0                      | 450                    | 195                    | 80,8                     | 85,7                     | 3121                            | 92,4                            |

**Tabelle 2-4:** Messergebnisse Variante 4

| $p_{Luft,aus}$<br>[Pa] | $T_{Luft,ein}$<br>[°C] | $T_{Luft,aus}$<br>[°C] | $T_{Wasser,ein}$<br>[°C] | $T_{Wasser,aus}$<br>[°C] | $\Delta\dot{Q}_{Wasser}$<br>[W] | $T_{Wasser,Stirnseite}$<br>[°C] |
|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 0                      | 450                    | 197                    | 80,8                     | 86,0                     | 3326                            | 87,9                            |

Durch die vorgestellten Versuchsergebnisse wird deutlich, dass das Wasser im Wärmeübertrager zu sieden beginnen kann. Durch die Bildung von Wasserdampfblasen und der damit einhergehenden Ausdehnung des Volumens oder deren Implosion (Kavitation), können die daraus resultierenden Spannungen, die der Wärmeübertrager erfährt, eine Beschädigung oder Zerstörung des Wärmeübertragers hervorrufen. Im Versuchsbetrieb wurde allerdings keine Beschädigung festgestellt. Dies hat mehrere Gründe. So war der Wärmeübertrager pro Messung nicht länger als einige Stunden in Betrieb, sodass die Beanspruchungsdauer geringer gewesen ist. Darüber hinaus wurde bei den Versuchen darauf geachtet, die Temperatur- und Leistungsniveaus schrittweise zu ändern, um Schäden am Versuchsstand vorzubeugen. Im nächsten Schritt soll geprüft werden, ob die Ergebnisse des Versuchs mit den Ergebnissen der Simulationen im **Kapitel 2.5** übereinstimmen. Der Vergleich zeigt, dass die Absolutwerte leicht abweichen, die Tendenz jedoch gegeben ist. Die Ergebnisse lassen sich am besten an der aufgenommenen Wärmemenge des Wassers miteinander vergleichen.

Die Differenz der übertragenen Wärmemenge zwischen Messung und Rechnung erklärt sich erstens durch die abweichende Position der Thermoelemente bei der Messung. Zweitens wurden bei den Simulationen nicht die charakteristischen Winglets der Kanäle berücksichtigt, die die Übertragungsfläche der Kanäle etwas vergrößern und für zusätzliche Verwirbelung sorgen. Dadurch sind die übertragene Wärmemenge und die erreichte Austrittstemperatur des Wassers im Versuch etwas höher.



## 2.2 Analyse der Ablagerungen

Der in der Praxis installierte Abgaswärmetauscher weist sichtbare weiße bis gräuliche Ablagerungen im oberen Bereich auf. Die Ablagerungen befinden sich an den Außen- und Innenwänden des Gehäuses der Halterung, an den Böden und an den Winglet-Kanälen. Die folgende **Abbildung 2-11** zeigt zwei Fotos der Ablagerungen an den Wärmetauschern.



**Abbildung 2-11:** Sichtbare Ablagerungen an der Halterung (rechts) und den Böden (links) des WTs

Eine Analyse der Ablagerungen an den Wärmetauschern zur Bestimmung der Elementzusammensetzung wurde mittels der Röntgenfluoreszenzmethode durchgeführt. Bei dieser Methode wird die Probe mit Röntgenstrahlen bestrahlt. In der Probe befindliche Elemente werden dadurch angeregt und eine Element-charakteristische Fluoreszenzstrahlung emittiert. Die emittierte Fluoreszenzstrahlung wird detektiert und kann mittels  $\mu$ RFA-Software eindeutig jedem Element zugeordnet werden.

Für die qualitative Bestimmung der Elementzusammensetzung der Ablagerungen an den Wärmetauschern wurden drei Bereiche analysiert. Der zu analysierende Bereich 1 befindet sich an der Außenwand der Wärmetauscher-Halterung, siehe

**Abbildung 2-12**. Die Ablagerungen, die sich direkt an der Halterung der Wärmetauscher befinden, werden auf die Elementzusammensetzung- und -verteilung hin untersucht. Der Bereich 2 befindet sich an der oberen Innenwand der Halterung der Wärmetauscher und der Bereich 3 an den Winglet-Kanälen, **Abbildung 2-13**.



**Abbildung 2-12:** Bereich1 (rote Markierung)

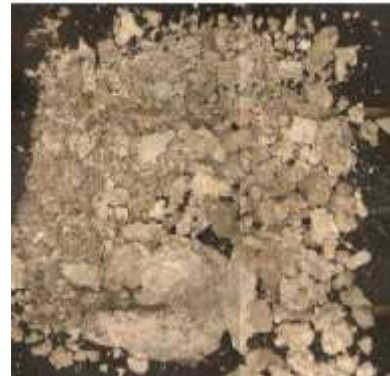


**Abbildung 2-13:** Bereich 2 und 3

Die Ablagerungen der Bereiche werden von den Oberflächen gekratzt und auf die Elementzusammensetzung hin untersucht, siehe **Abbildung 2-14** und **Abbildung 2-15**.

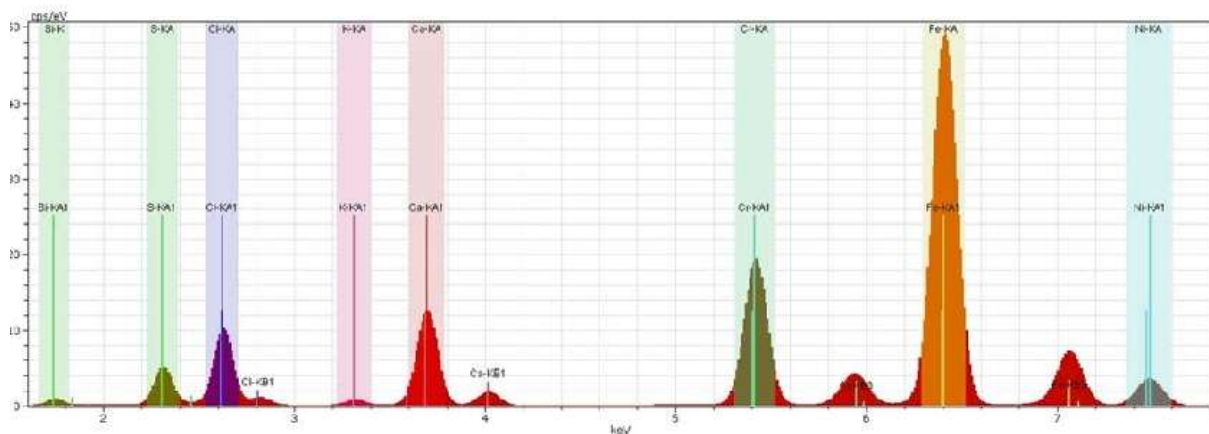


**Abbildung 2-14:** Analyzierte Ablagerungen Bereich 2 (Innenwand)



**Abbildung 2-15:** Analyzierte Ablagerungen Bereich 3 (Winglet-Kanäle)

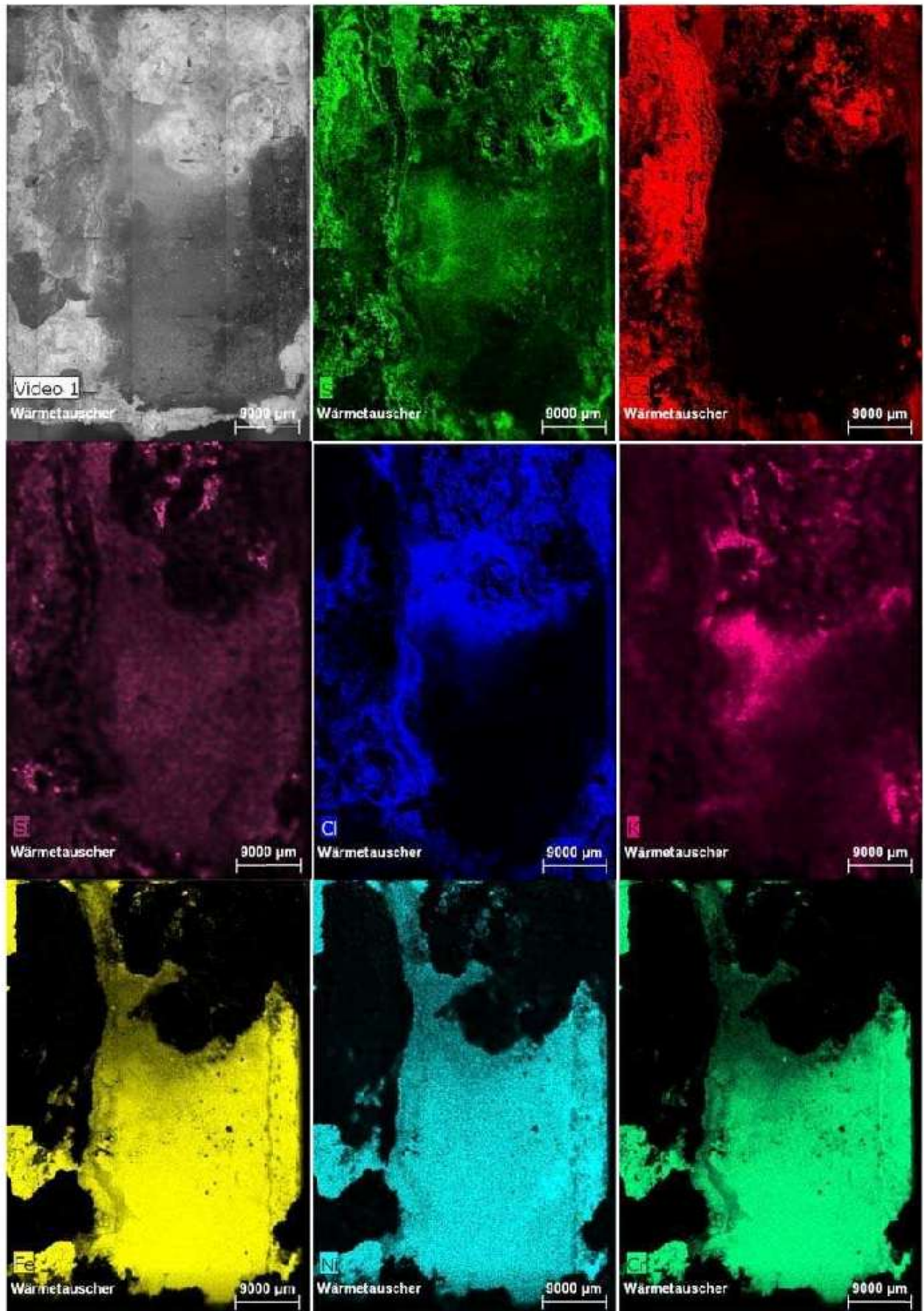
Bei der qualitativen Bestimmung durch  $\mu$ RFA-Messung der Bereiche 1 bis 3 wurden die Elemente Chrom (Cr), Nickel (Ni), Eisen (Fe), Calcium (Ca), Kalium (K), Chlor (Cl), Schwefel (S) und Silizium (Si) gefunden.



**Abbildung 2-16:** Summumspektrum der gesamten analysierten Probenfläche aus Bereich 1

Die qualitative Bestimmung der Ablagerungen aus dem Bereich 1 zeigt deutliche Peaks im Summumspektrum (**Abbildung 2-16**) der Elemente Chrom (Cr), Nickel (Ni) und Eisen (Fe) aus der Metalllegierung der WT-Halterung. Die Peaks der Elemente Calcium (Ca), Kalium (K), Chlor (Cl), Schwefel (S) und Silizium (Si) sind den anhaftenden Ablagerungen an der WT-Halterung zuzuordnen. Diese Annahmen werden durch die Verteilung der detektierenden Elemente in dem analysierten Bereich 1 anhand der dargestellten Elementverteilung in der **Abbildung 2-17** auf der nächsten Seite bestätigt.



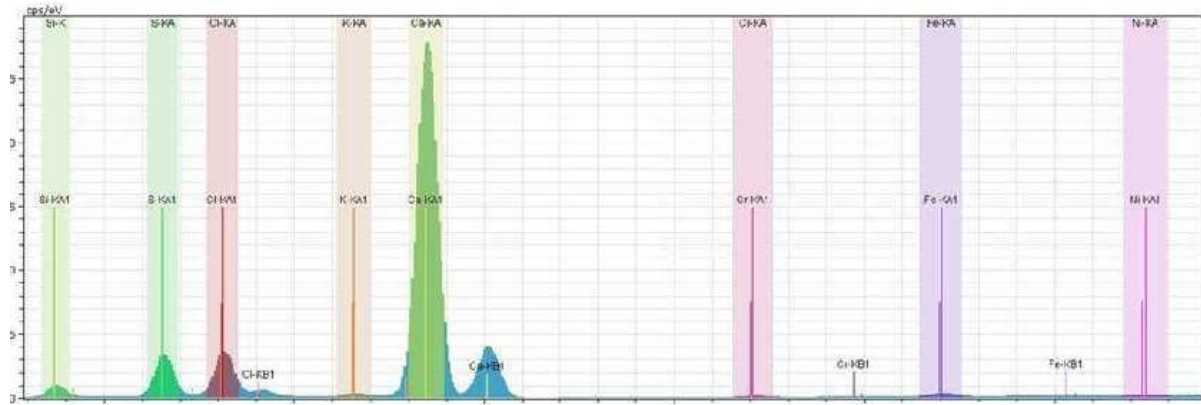


**Abbildung 2-17:** Farblich dargestellte Elementverteilung von links oben nach rechts unten, Schwefel, Calcium, Silicium, Chlor, Kalium, Eisen, Nickel und Chrom des Bereiches 1 (Außenwand)

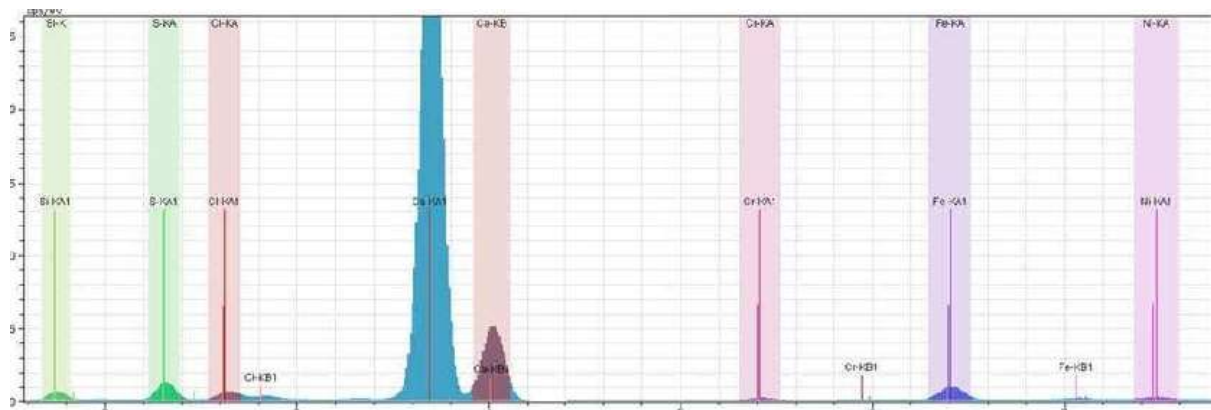
Seite 18 des Abschlussberichts zu „Innovative Nano-Beschichtung von Abgaswärmetauschern zur Steigerung der Effizienz und Lebensdauer“ unter der ZIM-Koop-Projekt-Nr.: KF3016101ST2 und KF2517704ST2

Die Analysensoftware der  $\mu$ RFA gibt Aufschluss über qualitative Unterschiede der Elementverteilung auf der analysierten Fläche.

Die Verteilungen der chemischen Elemente Chrom (Cr), Nickel (Ni), Eisen (Fe), Calcium (Ca), Kalium (K), Chlor (Cl), Schwefel (S) und Silizium (Si) sind in **Abbildung 2-18** dargestellt.



**Abbildung 2-18:** Summenspektrum der analysierten Ablagerung aus dem Bereich 2 (Innenwand)



**Abbildung 2-19:** Summenspektrum der analysierten Ablagerung aus dem Bereich 3 (Winglet-Kanäle)

Die qualitative Bestimmung der entnommenen Ablagerungen aus den Bereichen 2 und 3, **Abbildung 2-13**, zeigen im Summenspektrum (**Abbildung 2-18** und **Abbildung 2-19**) ebenfalls Peaks der Elemente Chrom (Cr), Nickel (Ni), Calcium (Ca), Kalium (K) (nur Bereich 2), Chlor (Cl), Schwefel (S) und Silizium (Si). Die detektierenden Signalintensitäten von Eisen, Nickel und Chrom sind jedoch im Vergleich zu den Messungen, die direkt an den Wärmetauschern (Bereich 1) durchgeführt wurden, viel schwächer. Das bedeutet, dass die Hauptbestandteile der Ablagerungen aus den Elementen Calcium, Kalium, Chlor, Schwefel und Silizium bestehen, die Peaks der Elemente Eisen, Nickel und Chrom sind Verunreinigungen aus den Ablagerungen, die von der Probenentnahme stammen.

Ergänzend zur Elementzusammensetzung wurden die Ablagerungen an den Wärmetauschern mittels Ionenchromatographie untersucht. Hierbei werden die Ionen Chlorid, Fluorid, Bromid, Nitrat, Nitrit, Phosphat und Sulfat bestimmt.

Es wurden jeweils Doppelbestimmungen von der Innenseite und von der Außenseite der Wärmetauscher vorgenommen. Wie die Peaks in den **Abbildung 2-20** und **Abbildung 2-21**

erkennen lassen, wurden Chlorid- und Sulfat-Ionen gefunden. Die Konzentrationen der Ionen auf der Innenseite sind höher als auf der Außenseite.

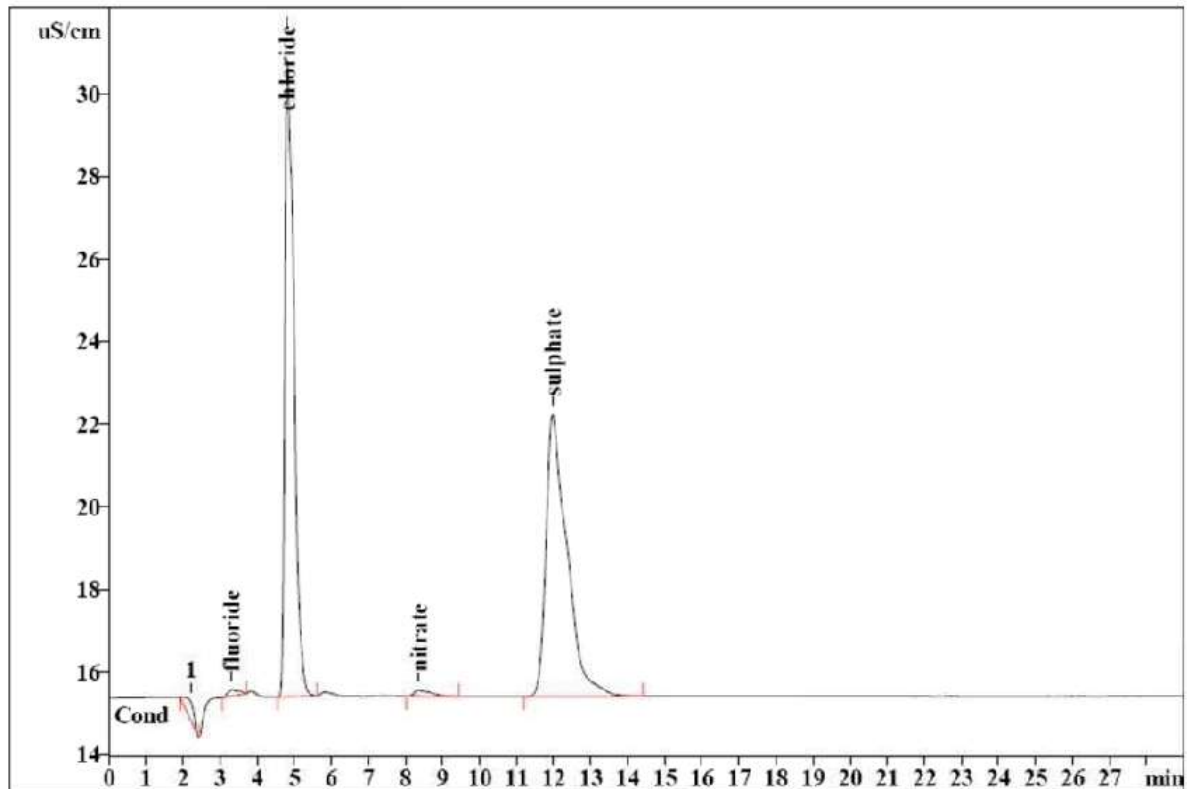


Abbildung 2-20: Ablagerungen innen

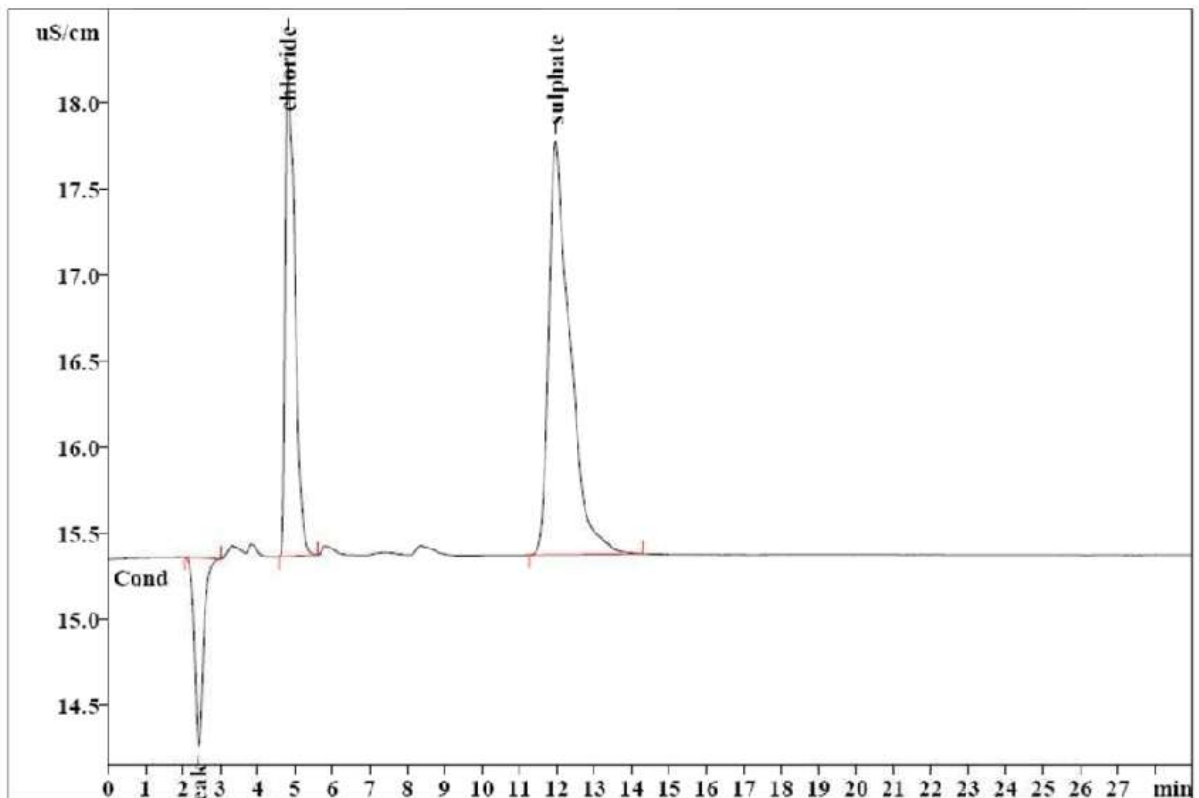


Abbildung 2-21: Ablagerungen außen

Seite 20 des Abschlussberichts zu „Innovative Nano-Beschichtung von Abgaswärmetauschern zur Steigerung der Effizienz und Lebensdauer“ unter der ZIM-Koop-Projekt-Nr.: KF3016101ST2 und KF2517704ST2

Nach den Auswertungen kann man davon ausgehen, dass die Hauptbestandteile der Ablagerungen aus Calciumchlorid ( $\text{CaCl}_2$ ) und Calciumsulfat ( $\text{CaSO}_4$ ) bestehen. Der hohe Calciumchlorid-Anteil spricht für die Wahrscheinlichkeit, dass es von der Wasserseite herrührt, wobei der Sulfatanteil aus dem Abgas stammt. Calciumchlorid liegt in fester, flüssiger und gasförmiger Form vor. Man spricht auch von desublimierten oder kondensierten Salzen. Durch Anlagerung von Partikeln wächst der Belag an der Wärmetauscheroberfläche stetig. Begünstigt wird die Bildung von Calciumchlorid bei einer Temperatur zwischen 500 °C und 700 °C. Calciumchlorid und Calciumsulfat reagieren miteinander, bilden Mischsalze und lösen eine Sulfatierung der Chloride aus. Der Belag gibt Chlorgas und Salzschmelzen frei. Salzschmelzen bilden sich an den Berührungsheizflächen und verursachen eine sogenannte Salzschmelzenkorrosion, Eisenchlorid wird stabilisiert und begünstigt dabei den Chlorangriff am Werkstoff. Dabei können verschiedene Korrosionsarten nebeneinander bestehen.

### **2.3 Analyse der Gaszusammensetzung**

Die Zusammensetzung des eingesetzten Erdgases beim Anlagenbetreiber, der die WT einsetzt, liegt nicht vor, da das zuständige Stadtwerk diese bis jetzt nicht zur Verfügung gestellt hat. Das verwendete Erdgas wird aus dem Ortsnetz der Stadtwerke Stuttgart bezogen. Vorlieferant ist hierbei die Gasversorgung Süddeutschland. Der Gesamtschwefelanteil liegt, nach schriftlicher Mitteilung der Gasversorgung Süddeutschland, zwischen 0,8 mg/m<sup>3</sup> bis 1 mg/m<sup>3</sup>. Eine genauere Angabe wollte man hier nicht treffen, da noch die schwefelhaltige Odorierung berücksichtigt werden muss. Die Odorierung erfolgt durch das Stadtwerk in Rastatt. Bei der Frage nach Einsatz von Biogasen wollte man diesbezüglich keine Aussage treffen. Eine Gasprobenentnahme vor Ort mittels Tedlar-Beutel aus dem Kugelhahn oder einer Gasmaus wurde aufgrund von Befürchtungen juristischer Folgen vom Industriekunden verweigert.

## 2.4 Metallografische Untersuchung

Wegen dieser Situation wurde beschlossen, anhand einer metallografischen Untersuchung weitere Ursachen für die Zerstörung des Werkstoffes zu analysieren. Die metallografische Untersuchung ist ein wichtiger Bestandteil bei der Schadensanalyse und erfolgt durch energiedispersive Röntgenmikroanalyse (EDX-Analyse).

Für die Untersuchung wurden die Böden der WT mit einem Teil der Winglet-Kanäle vom übrigen Wärmetauscher abgesägt und metallografisch untersucht, siehe **Abbildung 2-22**. Der Boden und die Winglet-Kanäle bestehen aus V4A Stahl, 1.4401, X5CrNiMo17-12-2, Austenit. Die **Abbildung 2-23** zeigt einen korrodierten und gerissenen Winglet-Kanal. Die Schäden liegen im oberen und unteren Bereich der Winglet-Kanäle vor. Die Gefügeuntersuchung zeigt in **Abbildung 2-24** die Rissbildung mit interkristallinen Kriechschädigungen. Eine ausgeprägte Rissverzweigung und einen teilweise herausgebrochenen Oberflächenbereich stellt **Abbildung 2-25** dar.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass im vorliegenden Fall eine chlorinduzierte interkristalline Spannungsrisskorrosion (SpRK) Ursache der Beschädigungen ist.

Voraussetzung für eine Spannungsrisskorrosion sind neben dem korrosiven Medium das Vorhandensein von Zugspannungen und eine Spannungsrisskorrosionsempfindlichkeit des Werkstoffes. Die bei der analytischen Untersuchung der Belagsbildung festgestellten Chloranteile bilden in Verbindung mit Feuchtigkeit ein korrosives Medium, das die Spannungsrisskorrosion auslöst. Zugspannungen können während des Betriebes durch zu hohe Temperaturen im Stahl-Bauteil entstehen. V4A Stahl, 1.4401, X5CrNiMo17-12-2, ist ein austenitischer rostfreier Stahl mit ausgezeichneter Korrosionsbeständigkeit, allerdings kann es bei dem Stahl zwischen 500 und 900 °C zur Ausscheidung von Chromkarbiden in den Korngrenzen kommen, was die Beständigkeit gegenüber interkristalliner Korrosion katastrophal verschlechtern kann.





**Abbildung 2-22:** Abgesägte Wärmetauscher-Böden mit Winglet-Kanälen



**Abbildung 2-23:** Korrodiertes und gerissener Winglet-Kanal, Rissbildung unter der Schweißnaht



**Abbildung 2-24:** Vergrößerung der Rissbildung; interkristalline Kriechschädigungen

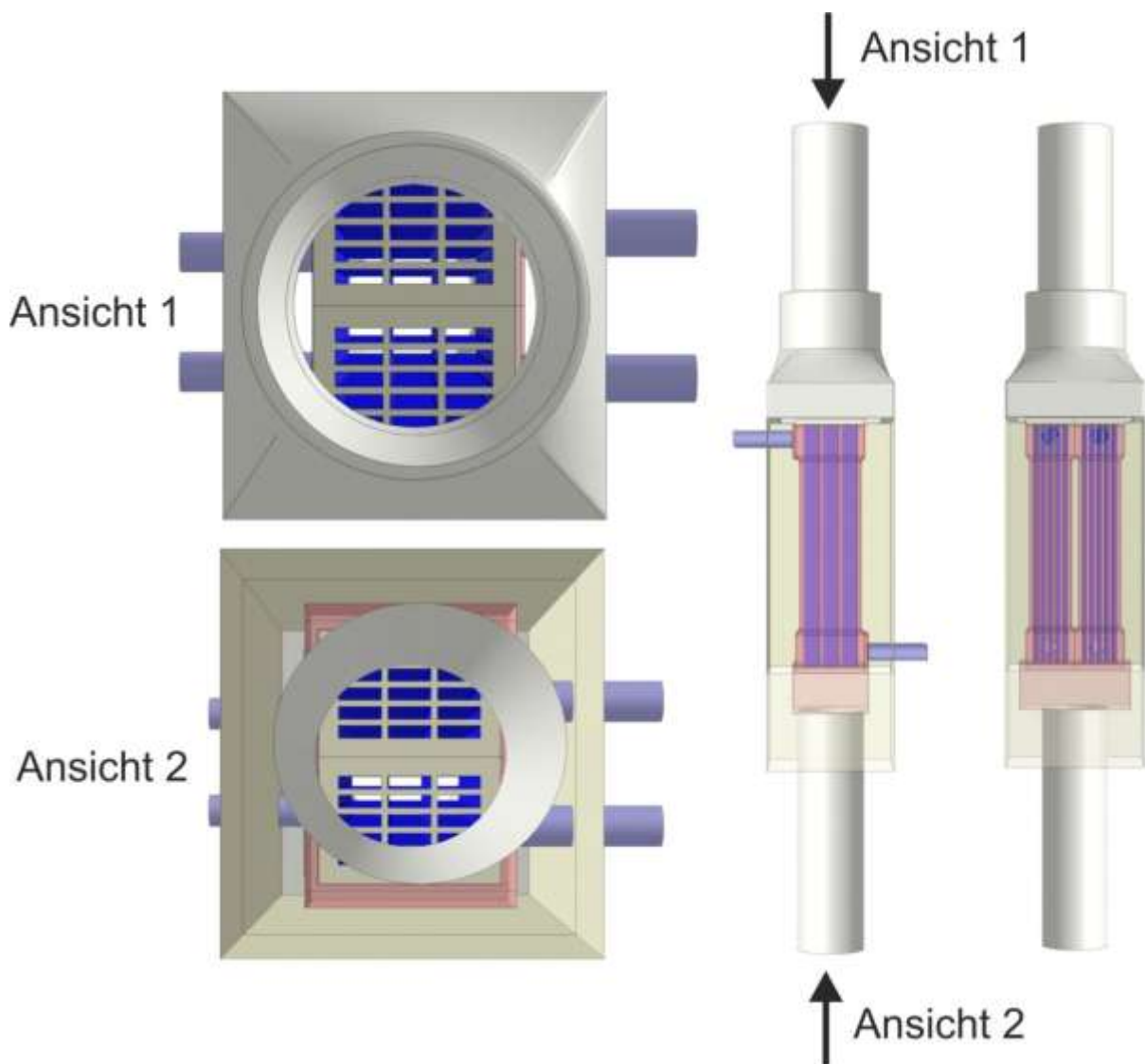


**Abbildung 2-25:** Ausgeprägte Rissverzweigung und teilweise herausgebrochene Oberflächenbereiche

## 2.5 Analyse der Geometrie des originalen Wärmetauscher

Die Simulationen des Wärmetauschers sind mit dem Programm ANSYS FLUENT durchgeführt worden. **Abbildung 2-26** zeigt die für das Programm erstellte Geometrie des WT. Gut zu erkennen sind die nebeneinander angeordneten Wärmeübertrager. In Ansicht 2 ist die nach unten offene Bauart zu sehen, wodurch der Zugunterbrecher entsteht. Das rote bzw. hellere Bauteil in Ansicht 2 stellt den Stutzen dar, in den die beiden Wärmeübertrager eingefasst sind.

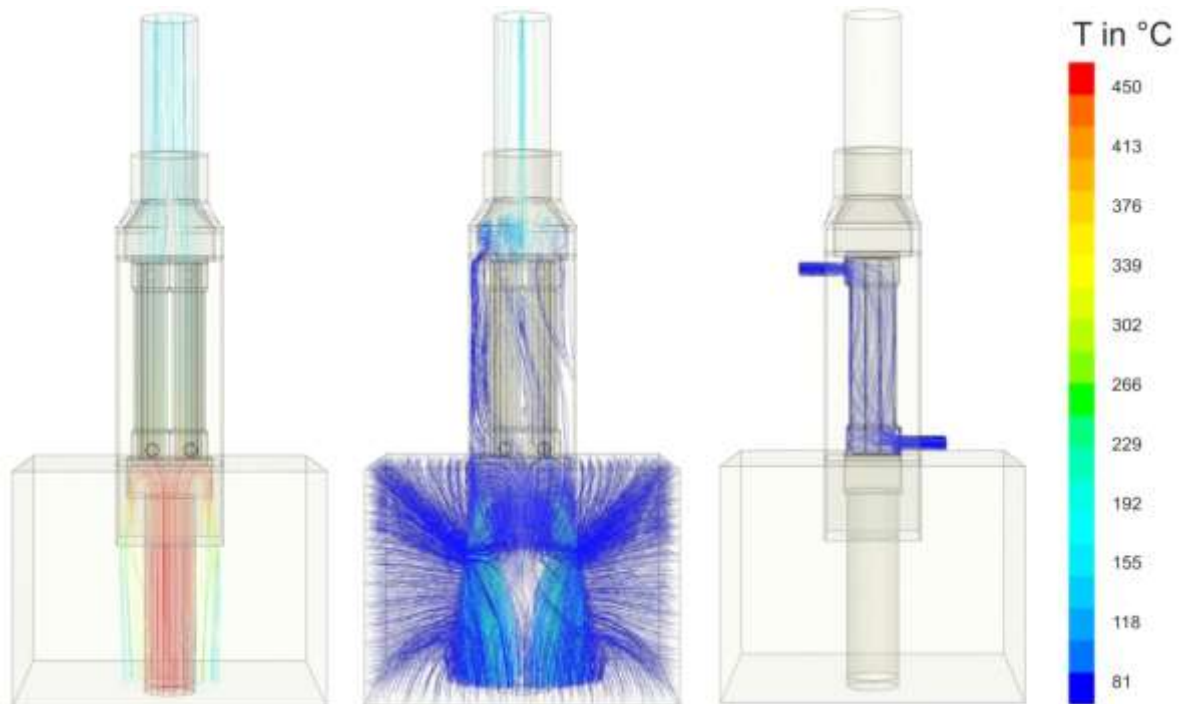
Auf die Gestaltung der detailreichen Winglet-Kanäle wurde verzichtet, da davon ausgegangen wurde, dass das Strömungsverhalten und damit der Wärmeübergang nicht wesentlich beeinflusst werden. Die Kanäle in der Geometrie für die Simulation sind glatt angenommen worden.



**Abbildung 2-26:** Verschiedene Ansichten des modellierten Wärmeübertragers



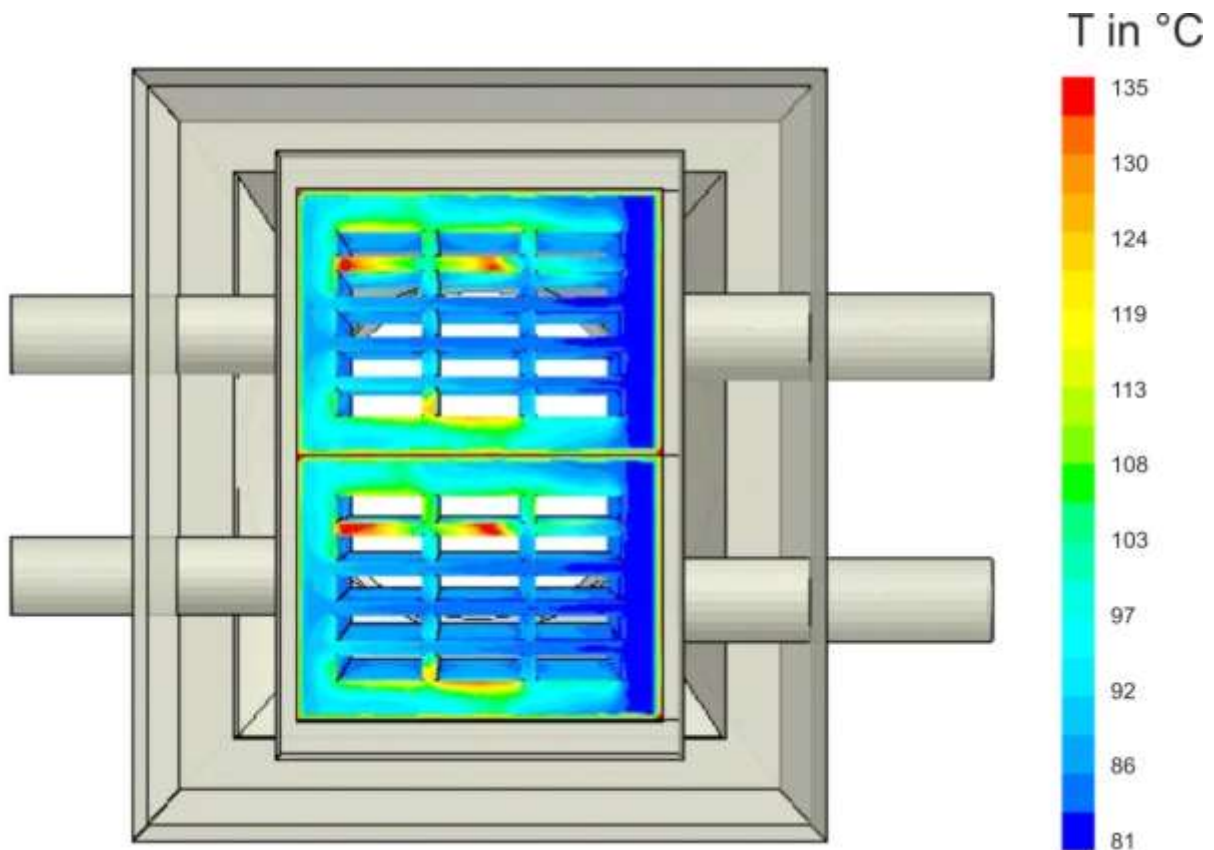
Für die Analyse des Ursprungszustandes, welcher der Variante 1 entspricht, werden zunächst die Stromlinien der Luft und des Wassers bei einem Druck im Kamin von 0 Pa betrachtet (**Abbildung 2-27**), was bedeutet, dass ohne Absaugung gearbeitet wird. Die Farbskala definiert zusätzlich die Temperatur in °C. Das modellierte quadratische Gebiet unterhalb des Wärmeübertragers definiert den Bereich der Umgebung, der für das Verhalten der Umgebungsluft bei der Simulation berücksichtigt wurde.



**Abbildung 2-27:** Stromlinien der heißen Luft (links), der Umgebungsluft (Mitte) und des Wassers (rechts) eingefärbt mit der Temperatur

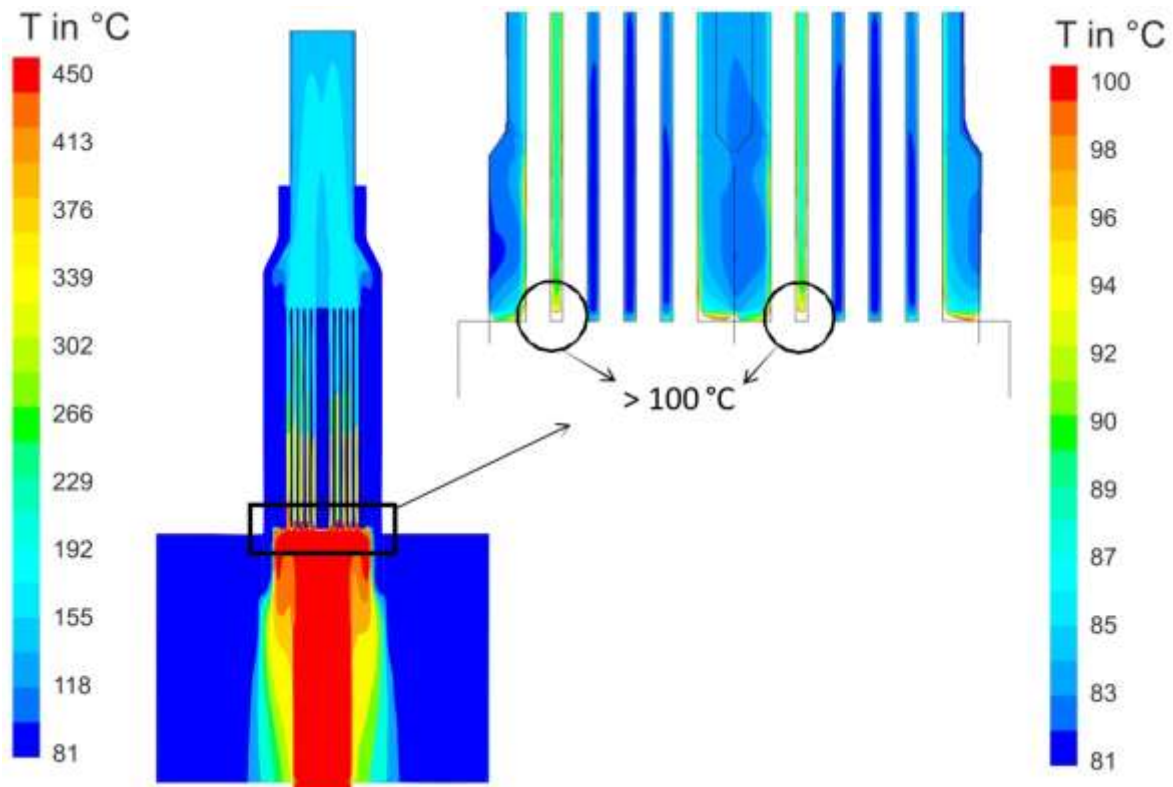
Die heiße Luft gelangt mit einer Temperatur von 450 °C durch das Abgasrohr in das Gehäuse des Wärmetauschers. In **Abbildung 2-27** links ist deutlich zu sehen, dass ein Teil der Luft umgelenkt wird und das Gehäuse nach unten hin wieder verlässt. Ein weiterer Teil strömt durch den Wärmeübertrager und der Rest zwischen Wärmetauscher und Gehäuse hindurch. Ebenso ist in der Bildmitte zu erkennen, wie sich die Umgebungsluft verhält. Im Bereich am Eingang des Gehäuses vermischt sich die Umgebungsluft mit dem Abgas und wird sowohl in den Wärmetauscher als auch davon weg geleitet. Im Bildteil rechts sind die Stromlinien des Wassers abgebildet, das den Wärmeübertrager im Gleichstrom, also von unten nach oben, durchströmt.

Eine erweiterte Betrachtung des Wassers erhält man an der Stirnseite des Wärmetauschers. **Abbildung 2-28** liefert einen Einblick in den Temperaturverlauf des Wassers direkt nach dem Eintritt in den Wärmetauscher.



**Abbildung 2-28:** Temperatur des Wassers an der Stirnseite des WT

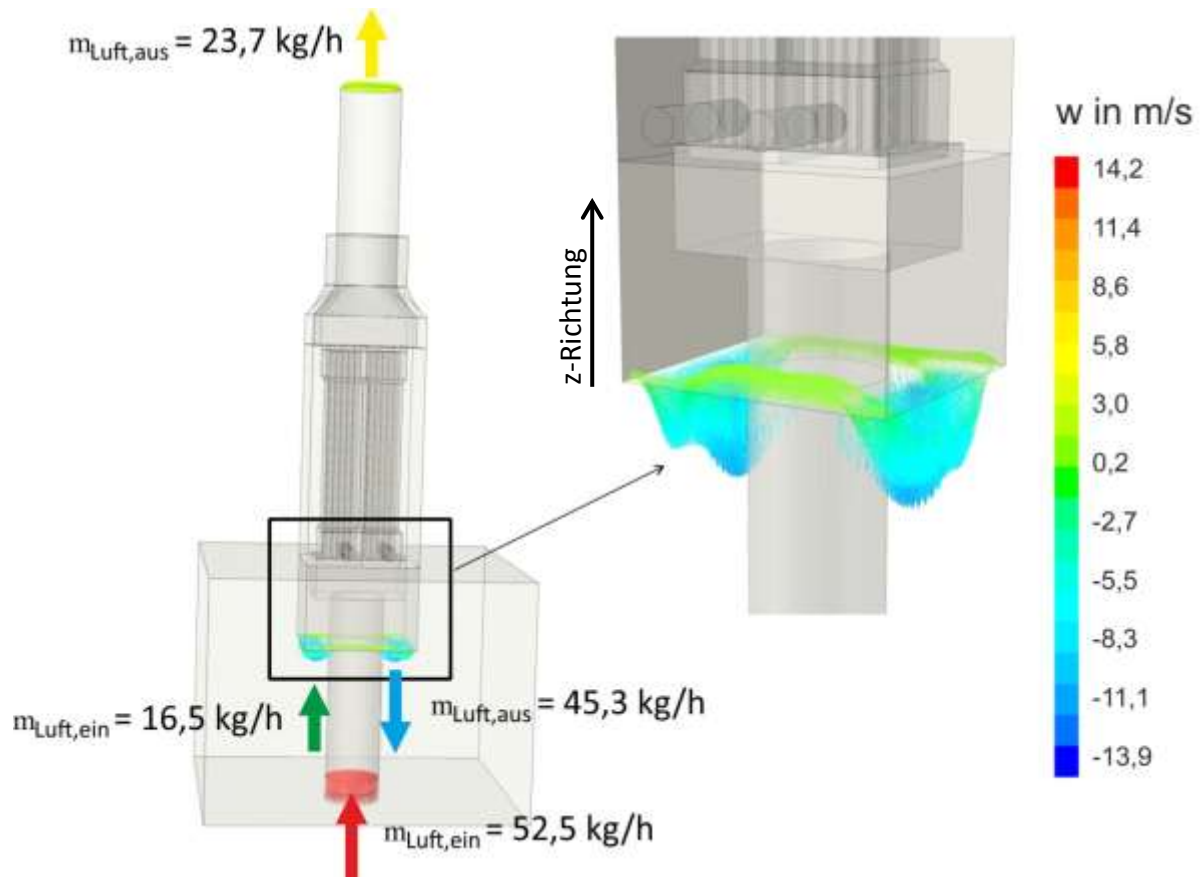
Die Betrachtung von **Abbildung 2-28** zeigt große Unterschiede der Wassertemperatur in der Eintrittsebene des Wärmeübertragers. Die Temperaturen reichen von 80 °C bis 135 °C. Das Wasser fließt von rechts kommend in den Wärmeübertrager. An dieser Stelle sind die niedrigsten Temperaturen im Bereich von 80 °C festzustellen. Besonders auffällig sind die Bereiche, in denen die Temperatur des Wassers bis zu 135 °C erreicht. Hier macht sich das Strömungsverhalten des Wassers bemerkbar. In den kälteren Zonen wird das Wasser schneller transportiert und erfährt deshalb einen geringeren Temperaturanstieg als an Stellen, wo der Austausch mit Frischwasser langsamer stattfindet. So entstehen in der Eintrittsebene Stellen, an denen die Temperatur des Wassers über den Siedepunkt ansteigt. Das Wasser neigt dazu, vom Zentrum aus nach oben zu strömen, bevor ein Austausch mit bereits aufgeheiztem Wasser in der untersten Ebene stattfinden kann. **Abbildung 2-29** verdeutlicht durch einen Längsschnitt des Profils, wo es im unteren Bereich des Wärmeübertragers zu Wassertemperaturen von über 100 °C kommt.



**Abbildung 2-29:** Temperaturen in der Schnittebene

Die Temperaturskala wurde bis 100 °C gewählt, sodass die Bereiche, in denen das Wasser diese Temperatur übersteigt, ausgeblendet (weiß) sind. Links im Bild sind die Temperaturen der Luft sowie des Wassers abgebildet, rechts dagegen ist nur die Temperatur des Wassers dargestellt. In den markierten Bereichen kommt es zu Temperaturen über 100 °C. Weiterhin fällt auf, dass die Wassertemperatur über die gesamte Länge des Wärmeübertragers nicht konstant ansteigt. Vielmehr fließt ein verhältnismäßig kalter Strom durch das Zentrum des Wärmeübertragers. In den äußeren Bereichen sind wesentlich höhere Temperaturen über der gesamten Länge des WT festzustellen. Das in den äußeren Bereichen siedende Wasser steigt nach oben, während im Zentrum ein erhöhter Austausch mit kaltem Frischwasser stattfindet.

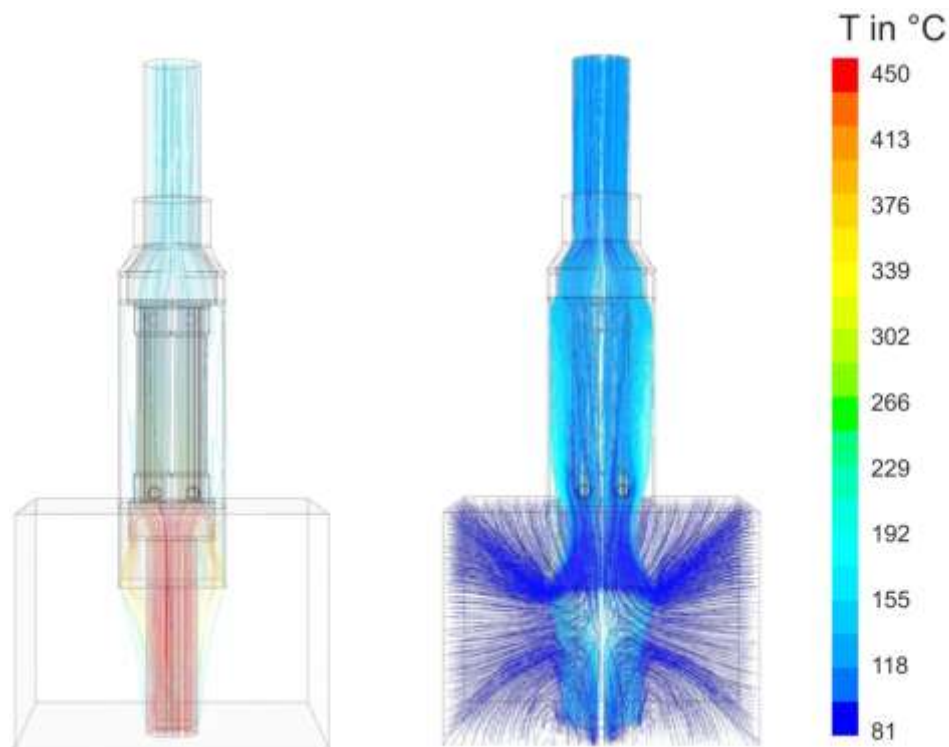
Das Fluid, das einen Wärmeübertrager durchströmt, muss immer einen Widerstand überwinden, der zu einem entsprechenden Druckverlust führt und die Wärmeübertragungsleistung maßgeblich beeinflusst. Deshalb wurden die Simulationen dahingehend analysiert, dass die einzelnen Massenströme der heißen Luft und der kalten Umgebungsluft um den WT an den entsprechenden Grenzflächen bilanziert wurden. **Abbildung 2-30** zeigt die Aufteilung der verschiedenen Massenströme für die Variante 1 (Ursprungszustand).



**Abbildung 2-30:** Massenbilanz und Geschwindigkeitsvektoren der Luftströme für Ursprungszustand mit  $p_{\text{Kamin}} = 0 \text{ Pa}$

In **Abbildung 2-30** werden zusätzlich die Geschwindigkeitsprofile der Luft in z-Richtung gezeigt. Anhand der Skala für die Geschwindigkeit ist festzustellen, dass das Luftgemisch das Gehäuse mit einer höheren Geschwindigkeit verlässt als die Umgebungsluft in das Gehäuse hineinströmt.

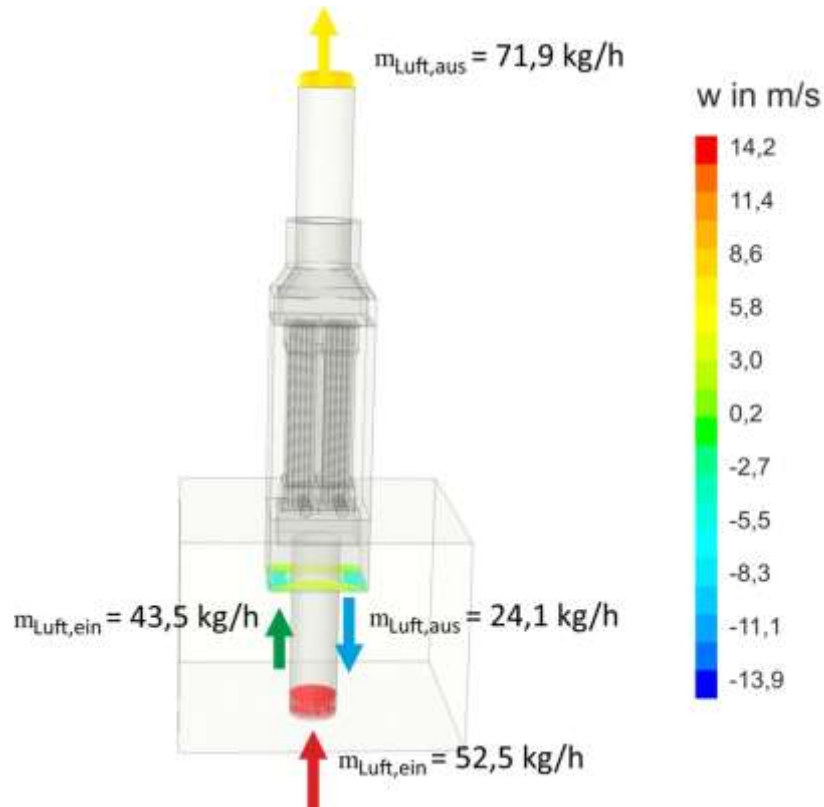
Zum Vergleich wurde der Ursprungszustand auch mit einem Unterdruck im Kamin von  $p_{\text{Kamin}} = -50 \text{ Pa}$  simuliert. Durch den erhöhten Unterdruck wird erwartet, dass eine größere Menge des Abgases für die Wärmeübertragung genutzt werden kann. Dabei ergaben sich für die Stromlinien der Heiß- und Umgebungsluft folgende Ergebnisse, welche in der **Abbildung 2-31** wiedergegeben sind.



**Abbildung 2-31:** Stromlinien der heißen Luft (links) und der Umgebungsluft (rechts) mit der Temperatur eingefärbt für Ursprungszustand mit  $p_{\text{Kamin}} = -50 \text{ Pa}$

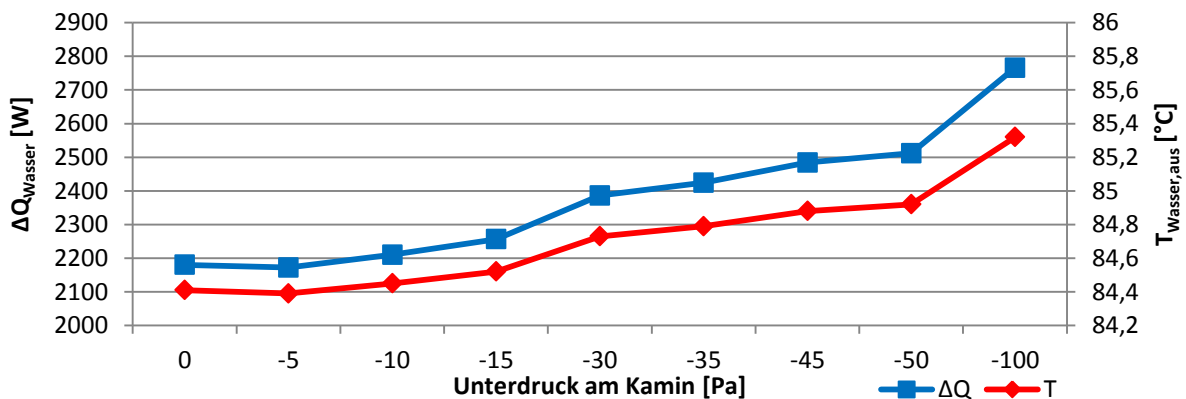
Im Vergleich zu **Abbildung 2-27** ist hier deutlich zu erkennen, dass mehr Luft durch das Gehäuse des Wärmeübertragers gelangt. Nach wie vor strömt nicht die gesamte Heißluft durch den Wärmeübertrager und die Menge, der aus der Umgebung angesaugten Luft erhöht sich. Zu welchen Teilen dabei Umgebungsluft und Heißluft durch den Wärmeübertrager strömen, ist anhand der Massenbilanz in **Abbildung 2-32** zu erkennen.

Im Vergleich zu **Abbildung 2-30** verringert sich durch die zusätzliche Absaugung zwar der Massenstrom, der das Gehäuse nach unten hin verlässt, dafür wird aber auch mehr Umgebungsluft angesaugt. Der Austrittsmassenstrom erhöht sich dadurch um mehr als das Dreifache. Bei der Betrachtung der Temperatur des Wassers sind in der Simulation dagegen kaum Unterschiede durch die Erhöhung des Absaugdruckes erkennbar. Temperaturen von über  $100 \text{ °C}$  werden an nahezu den gleichen Stellen ermittelt. In **Abbildung 2-33** sind die an das Wasser übertragene Wärmemenge und die Temperatur des Wassers in Abhängigkeit des angelegten Unterdruckes im Abgaskanal dargestellt. Es ist eine kontinuierliche Steigerung der Temperatur und der übertragenen Wärmemenge in Abhängigkeit des Unterdrucks im Kamin festzustellen.



**Abbildung 2-32:** Massenbilanz und Geschwindigkeitsvektoren der Luftströme für den Ursprungszustand mit  $p_{\text{kamin}} = -50 \text{ Pa}$

Alle Ergebnisse der Simulationen des Ursprungszustandes vom untersuchten Edelstahlwärmetauschers deuten darauf hin, dass das Wasser im Inneren des Wärmeübertragers partiell zu verdampfen beginnt und dadurch Kavitation entsteht, welche wiederum zum Versagen des Wärmetauschermaterials beiträgt. Die Risse entstehen an der Stirnseite, durch welche dann Wasser nach außen dringt. Das austretende Wasser verdampft dann durch die hohe Temperatur des heißen Abgases und hinterlässt Ablagerungen, welche die Kanäle des Wärmetauschers zusetzen.



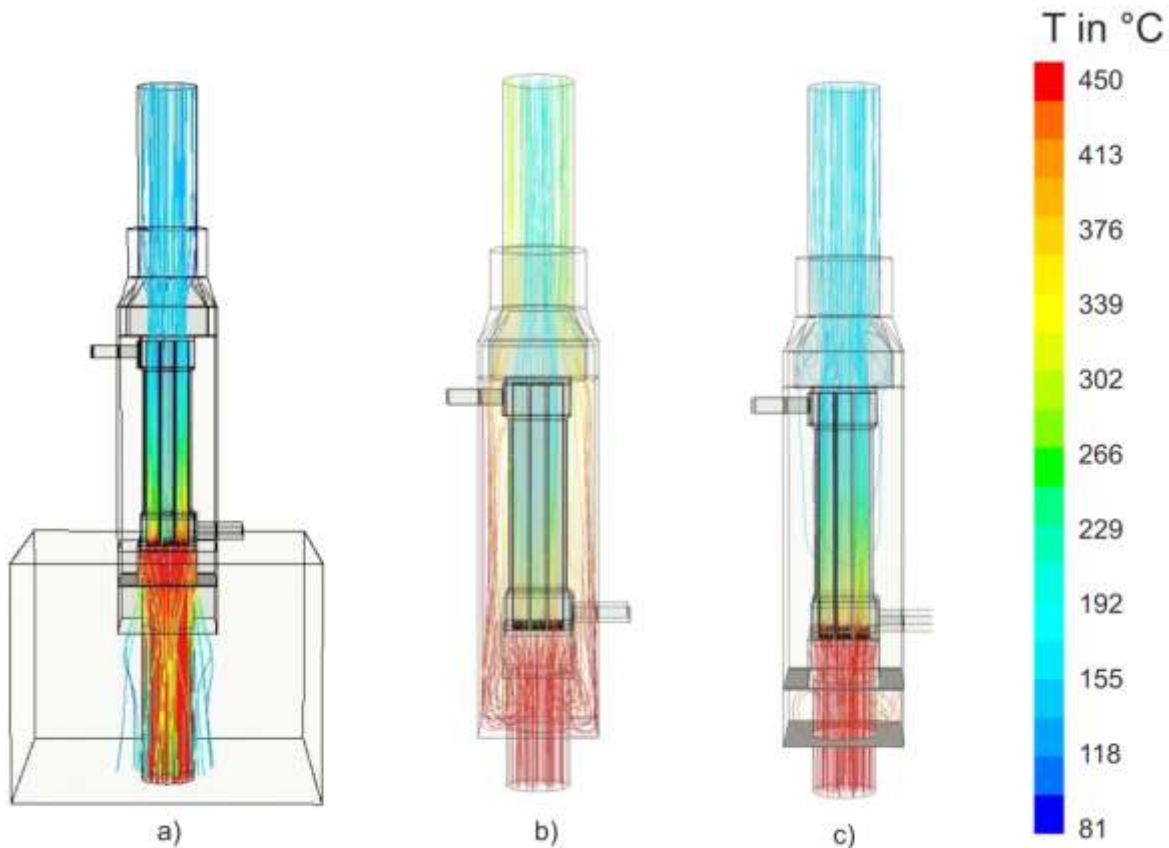
**Abbildung 2-33:** Übertragene Wärmemenge und Wassertemperatur am Austritt als Funktion des anliegenden Unterdrucks im Kamin



## 2.6 Simulation von Alternativvarianten

Die Auswirkungen von alternativen Einbausituationen auf die Effizienz und die kritischen Temperaturen des Wassers im Wärmeübertrager wurden geprüft. Die genaue Spezifikation der untersuchten Varianten wurde in **Kapitel 2.1** ausführlich beschrieben.

Die Temperaturverläufe der heißen Luft für die alternativen Varianten sind an Hand der farbigen Strömungslinien in **Abbildung 2-34** zu sehen.

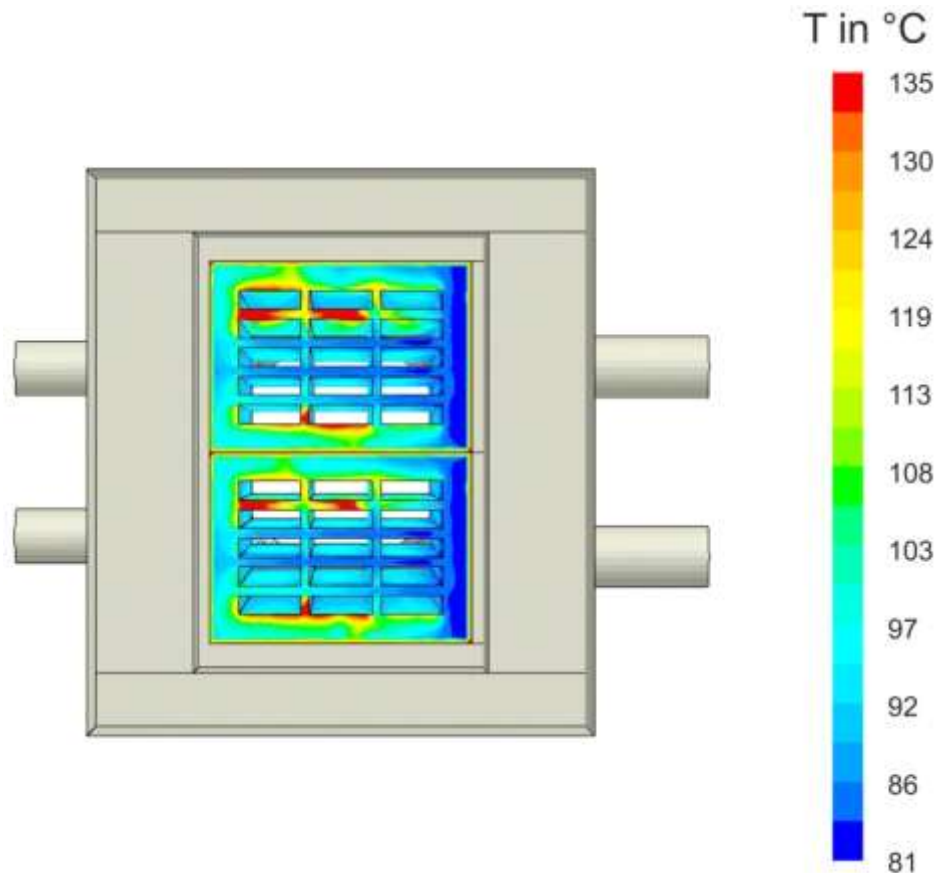


**Abbildung 2-34:** Alternative Varianten

- a) Die Seiten sind im Gehäuse des WTs geschlossen (Variante 2)
- b) Der Umgebungsluft-Eintritt ist geschlossen (Variante 3)
- c) Die Seiten im Gehäuse und der Umgebungsluft-Eintritt sind geschlossen (Variante 4)

In der Variante 2 wird die Luft durch ein eingesetztes Blech daran gehindert, in den Zwischenraum von Wärmeübertrager und Gehäuse zu strömen. Die Luft kann das Gehäuse aber nach unten hin immer noch verlassen. Dies ist in Variante 3 und 4 nicht mehr der Fall. Die Luft kann nur noch nach oben innerhalb des Gehäuses vom Wärmetauscher strömen. Insbesondere bei Variante 4, welche eine Kombination des Varianten 2 und 3 darstellt, ist der Wärmeübertrager extremen Bedingungen ausgesetzt. Die Luft wird durch den Wärmeübertrager zwangsgeführt und staut sich an der Stirnseite, was wiederum auch einen höheren Druckverlust mit sich bringt. Deshalb sind bei dieser Variante die höchsten Temperaturen des Wassers an der Stirnseite zu erkennen.

Bestätigt wird dies durch **Abbildung 2-35**, welche die Temperaturverteilung des Wassers an der Stirnseite darstellt.



**Abbildung 2-35:** Temperatur des Wassers an der Stirnseite für Variante 4 mit  $p_{\text{Kamin}} = -50$  Pa

Bei einem Vergleich mit **Abbildung 2-28** zeigt sich, dass sich bei Variante 4 die Flächen, an denen das Wasser Temperaturen von bis zu 135 °C aufweist, deutlich vergrößert haben. Ebenfalls wieder in den Bereichen, in denen durch das Strömungsverhalten des Wassers ein verminderter Austausch mit Frischwasser stattfindet.

Bei allen Varianten wurde eine lokale Überhöhung der Temperatur im Wasserkreislauf über die Siedetemperatur hinaus an der Stirnseite des Wärmeübertragers festgestellt. Je nach Einbausituation wird außerdem ein Großteil der einströmenden heißen Luft nicht durch den Wärmeübertrager geführt, sondern entweder am WT vorbei im Gehäuse oder sogar um 180° nach unten umgelenkt (Staupunktphänomen). Die Erkenntnisse aus der Analyse der Simulationen zeigen in Kombination mit den Ergebnissen der experimentellen Messkampagnen, dass sich das Schadensbild an den Edelstahlwärmetauschern durch einen Wasserschaden erklären lässt, welcher durch eine Spannungsrisskorrosion im Bereich der Stirnseite hervorgerufen wird.



## 2.7 Nanotechnologie

Die Nanobeschichtung wird in einem CVD-Verfahren (chemische Gasphasenabscheidung) bei einer für Edelstahl verträglichen Temperatur abgeschieden. Die niedrige Temperatur wird durch ein zusätzliches Prozessgas als Katalysator erreicht, vergleichbare CVD-Prozesse laufen bei wesentlich höheren Temperaturen ab ( $> 600\text{ °C}$ ). Die Beschichtung selbst besteht aus amorphem, reinen  $\text{SiO}_2$ , welches auf einer vorbehandelten und aktivierten Oberfläche abgeschieden wird. Basis für die hohe Unterwanderungsbeständigkeit der Beschichtung ist ein Vorbehandlungsprozess, der eine gleichmäßige und aktive Oberfläche bereitstellt. Hierzu werden in einem ersten Schritt die anhaftenden Verschmutzungen ohne Materialangriff entfernt, anschließend wird bei Bedarf gezielt und mit präzise eingestelltem Abtrag gebeizt. Vor dem Trocknungsprozess werden die Bauteile noch von anhaftenden Oxiden befreit, sodass sich eine gleichmäßige, dünne und aktive Oxidschicht auf der gesamten Oberfläche ausbilden kann. Diese Oxidschicht nimmt bereitwillig das Beschichtungsmaterial an, d. h., über Sauerstoffbrücken entstehen chemische Bindungen zwischen Substrat und Beschichtung.

Die Metallatome sind jetzt in der Lage neue Atome, in diesem Fall  $\text{SiO}_2$ -Atome, an sich zu binden. In den **Abbildung 2-36** und **Abbildung 2-37** ist der Wärmetauscher vor und nach der Reinigung zu sehen. Für den Punkt der Variation der Parameter der Nanobeschichtung wurden für die Beschichtung 30 Wärmetauscher gereinigt und anschließend mit  $\text{SiO}_2$  beschichtet.



**Abbildung 2-36:** Wärmetauscher vor der Reinigung



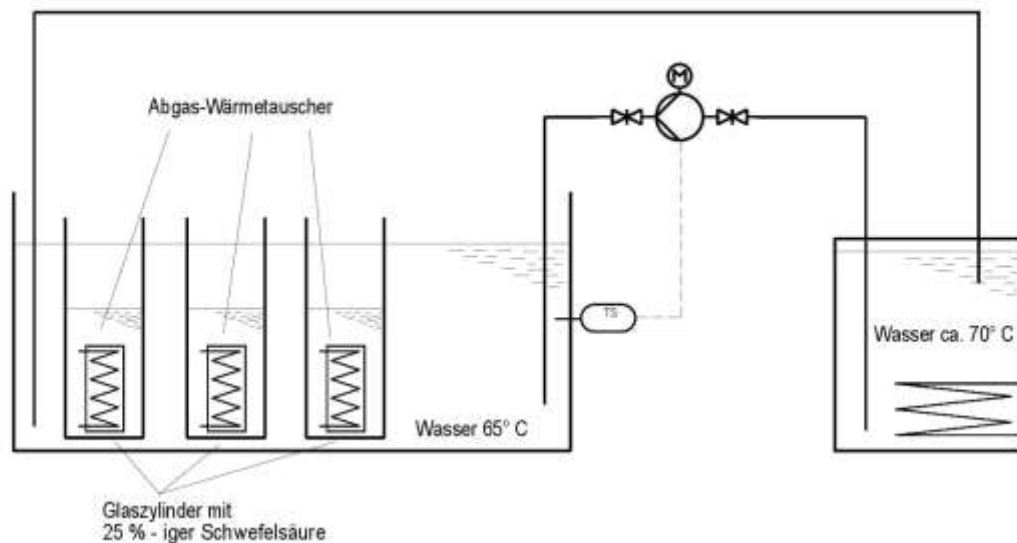
**Abbildung 2-37:** Wärmetauscher nach der Reinigung

### **2.7.1 Beschichtungsvariationen neuer Wärmetauscher**

Die technischen Anforderungen an eine Beschichtung für Abgaswärmeübertrager sind hoch:

- wirksamer Korrosionsschutz
- auf einer komplexen dreidimensionalen Oberfläche
- mit hoher Temperaturbeständigkeit
- und ohne negative Auswirkungen auf den Wärmeübergang

Drei von vier dieser Anforderungen können mit kommerziell verfügbaren Nanobeschichtungen nicht erfüllt werden. Im laufenden Projekt wurde daher eine innovative Beschichtungsvariante eingesetzt, welche in einzigartiger Weise die Vorteile etablierter Nanobeschichtungen und thermischer CVD-Verfahren miteinander kombiniert. In einem atmosphärischen CVD-Prozess wird reines Siliziumdioxid in amorpher Form mit einer Schichtdicke von  $< 1 \mu\text{m}$  abgeschieden. Dies gelingt in einem chemisch katalysierten Prozess gleichmäßig und mit komplexen dreidimensionalen Geometriestrukturen bereits bei Temperaturen zwischen 200 und 300 °C. So konnte der Abgaswärmeübertrager problemlos beschichtet werden. Die  $\text{SiO}_2$ -Beschichtung ist ein dünner elastischer und transparenter Film und kleiner als  $1 \mu\text{m}$ . Beschichtungen dieser Größenordnungen nehmen deshalb keinen Einfluss auf die Wärmeübertragung und verfügen über eine thermische Stabilität bis zu 450 °C.



**Abbildung 2-38:** Säuretest in einer 25%igen Schwefelsäure

Die Haltbarkeit der Beschichtung wurde in einem besonderen Schwefelsäure-Test mit einer Thermo-Schocktherapie, siehe **Abbildung 2-38**, getestet, dies bedeutet eine mehrmalige hintereinander folgende Beheizung und Abschreckung der beschichteten Wärmetauscher. Im Vergleich mit unbeschichteten Wärmetauschern, die unter den gleichen Voraussetzungen getestet wurden, hat sich der Korrosionsschutz der beschichteten Wärmetauscher und somit die Lebensdauer um das 18-fache verlängert.

Schichtmaterialien auf der Basis von Siliziumdioxid sind gegen Temperatur, Wasser und Säure beständig und mit Plasma-CVD-Prozessen, als Nanolacke oder Sol-Gel-Systeme herstellbar. Für die vorgestellte Anwendung sind diese Beschichtungen aber nicht geeignet, weil dreidimensionale Oberflächen mit Hinterschneidungen, scharfen Kanten und hohen Aspektverhältnissen (Verhältnis der Tiefe einer Struktur zur Breite der Zugangsöffnung) damit nicht gleichmäßig beschichtet werden können. Technische Lösungen für hohe Aspektverhältnisse stehen mit sogenannten thermischen CVD-Verfahren zur Verfügung, die aber nur für Werkstoffe und Bauteile mit sehr hoher Temperaturbeständigkeit ( $> 900\text{ °C}$ ), z. B. Edelstahl, eingesetzt und damit für eine breite Masse von Materialien im Anlagenbau nicht genutzt werden können.

## 2.7.2 Gesundheitsrisikogruppen

In diesem Kapitel wird die Risikobetrachtung des eingesetzten Beschichtungsverfahrens in die Gesundheitsrisikogruppen nach Niels Boeing erörtert. Es besteht oft die Befürchtung, dass die Nanotechnik - wie alle Technologien - Gefahren verbergen. Seit einigen Jahren häufen sich die Meldungen von Toxikologen, dass die „Wundermaterialien“ der Nanowelt für Organismen schädlich sein könnten. Niels Boeing schlägt deshalb in seinem Buch „Die Risi-

Seite 36 des Abschlussberichts zu „Innovative Nano-Beschichtung von Abgaswärmetauschern zur Steigerung der Effizienz und Lebensdauer“ unter der ZIM-Koop-Projekt-Nr.: KF3016101ST2 und KF2517704ST2

ken der Nanotechnik“ vor, die Nanotechnologie in drei Klassen einzuteilen, welche im Nachfolgenden kurz einzeln erläutert werden.

#### Klasse 1 - isolierte Nanotechnologie

Zu dieser Klasse gehören diverse Werkzeuge mit fest eingebetteter Nanokomponente, die somit von der Umwelt isoliert sind. Werkstoffe mit selbstreinigender Antihaft-Beschichtung oder Nanoelektronik. Unklar ist hierbei bislang, was mit den Materialien passiert, wenn die Nanokomponenten entfernt oder entsorgt werden müssen.

#### Klasse 2 a - unbeabsichtigt bioaktive Nanotechnologie

Zu dieser Klasse gehören künstlich hergestellte Nanopartikel, die nicht in einer Matrix stecken und somit bioaktiv sind. Ihre Anwendungen finden sich in der Nanomedizin und anderen industriellen Prozessen wieder. Sie könnten sich als schädlich erweisen, wenn Nanopartikel mit Zellen in Wechselwirkung treten.

#### Klasse 2 b - intendiert bioaktive Nanotechnologie

Hierbei handelt es sich um Nanopartikel, die die geschmacklichen und gesundheitlichen Eigenschaften der Lebensmittel verbessern sollen und neue Diagnoseverfahren in der Nanomedizin und Tumorthherapie, bei denen winzige Teilchen gezielt in den Körper gebracht werden. Der Kern der nanostrukturierten Mittel besteht bislang aus giftigen Schwermetallen wie Cadmiumselenid (CdSe), der mit Biomolekülen umhüllt ist. Nanopartikel, die im Kampf gegen den Krebs als Medikamententransporter dienen, Käfige aus Peptiden, Proteinen oder DNA-Molekülen, die in den Zellkernen Erbinformationen codieren. Die Gefahr hierbei ist das Risiko, dass sich solche DNA-Partikel im Zellinneren auflösen, was wiederum einen sogenannten Gentransfer auslösen und sich als Genom integrieren könnte.

#### Klasse 3- disruptive Nanotechnologie

Zu dieser Klasse können alle Versuche gefasst werden, künstliche Mikroorganismen herzustellen, also autonom agierende Nanosysteme, welche die Fähigkeit haben, sich zu vervielfältigen und Lebewesen massiver und großflächiger schädigen könnten als bioaktive Nanotechnik. Beispiele sind hierfür die Drexler'schen Nanosysteme, Nanoroboter aus diamantartigen Kohlenstoffverbindungen oder das 2003 von Craig Venter entwickelte Virus, dessen 5386 Basenpaare zu einem in der Natur nicht existierenden Genom verbunden wurden. Hierbei sollen künstliche Mikroben künftig als Arbeitstiere zur Energiegewinnung und Schadstoffbeseitigung dienen. Die Gefahr kann hierbei sein, dass künstliche Viren zu einer unkontrollierbaren Bedrohung mutieren.

Bei den in diesem Projekt eingesetzten und untersuchten Wärmetauschern mit geplanter SiO<sub>2</sub>-Beschichtung handelt es sich um eine Nanotechnologie, die von der Umwelt isoliert ist. Die Nanopartikel sind fest im Substrat eingebettet und stellen deshalb keine unmittelbare Gefahr für die Gesundheit dar. Diese Methode der Beschichtungsform ist somit in die Gesundheitsrisikogruppe der Klasse 1 einzuordnen.

## 2.8 Neuauslegungsvorschlag Wärmetauscher Geometrie

Mit der Erkenntnis, dass sich der hier untersuchte Wärmeübertrager für den speziellen Einsatz an Strahlheizrohbrennern nicht eignet, wird ein alternativer Wärmeübertrager vorgeschlagen. Als Vorschlag liegt eine Konstruktionszeichnung der Firma Runkel vor, welche einen Lösungsvorschlag der Projektpartner wiedergibt.

Im neuen Wärmetauscher werden in einem zylindrischen Gehäuse zwei Edelstahlwendeln mit nanoskopischer SiO<sub>2</sub>-Oberflächenschichtung platziert. Die Wendeln haben unterschiedliche Durchmesser, sodass sie ineinander geschoben werden können. Auf der Mittelachse des Gehäuses befindet sich ein Zylinder, welcher als Dorn fungiert, und der das anströmende Abgas zwangsweise entlang der Wendeln im Gehäuse führen soll. Der Wärmeübertrager soll ebenfalls im Gleichstrom betrieben und wieder in gleicher Position mit Zugunterbrecher auf dem Abgasrohr platziert werden. Der Einsatz im Nachlauf von Strahlheizrohbrennern mit einer Abgastemperatur von > 500 °C stellt ebenfalls keine Probleme für die neue Variante dar. Das Temperaturniveau, Eingang gegenüber Ausgang, lässt sich gut über die Durchflussmenge und den Rohrquerschnitt steuern. So lassen sich auch verschiedene Volumenströme realisieren. Die offenere Gestaltung des Bereiches im Eintritt des heißen Abgases wird dazu führen, die Überhitzung des Wassers zu vermeiden. Der Rohrwendel-Wärmeübertrager hat keine Einschränkung, eine ähnliche Leistung wie der konventionelle Wärmeübertrager zu erreichen oder noch besser zu sein. Durch den vereinfachten geometrischen Aufbau und der zusätzlichen Beschichtung lässt sich der Wärmetauscher einfacher, besser und vor allem nicht destruktiv reinigen. Die Konstruktion ist auch noch durch mehrere Parameter, wie zum Beispiel die Wahl des Materials für die Kühlwendeln, beeinflussbar. Wenn beispielsweise die Wärmeübertragung durch Edelstahlrohrwendeln nicht ausreichend ist, kann man auf Materialien zurückgreifen, welche eine höhere Wärmeübertragung ermöglichen aber nicht für die ursprüngliche Geometrie geeignet waren.

Ziel ist es aber, die Wendeln in Edelstahl auszuführen und mit der zusätzlichen Nanobeschichtung noch besser gegen aggressive Medien zu schützen.

Für die neue Wärmetauschergeometrie wurden folgende Abmessungen ausgewählt:

- Durchmesser des Edelstahlrohrs zur Herstellung der Rohrwendeln: 10 x 1 mm
- Zwei Rohrwendeln ineinander geschoben, bestehend aus je 16 Windungen mit folgenden Abmessungen:
  - Außendurchmesser der Rohrwendeln: 70 mm und 90 mm
  - Höhe der Rohrwendeln: 300 mm
- Zusammenführen der Rohrwendeln mit einem Anschlussstück / Verteilerstück innerhalb des Gehäuses. Abgehende Rohrleitung mit einem Durchmesser von 15 mm.

Zudem wurden verschiedene Gehäusegeometrien untersucht:

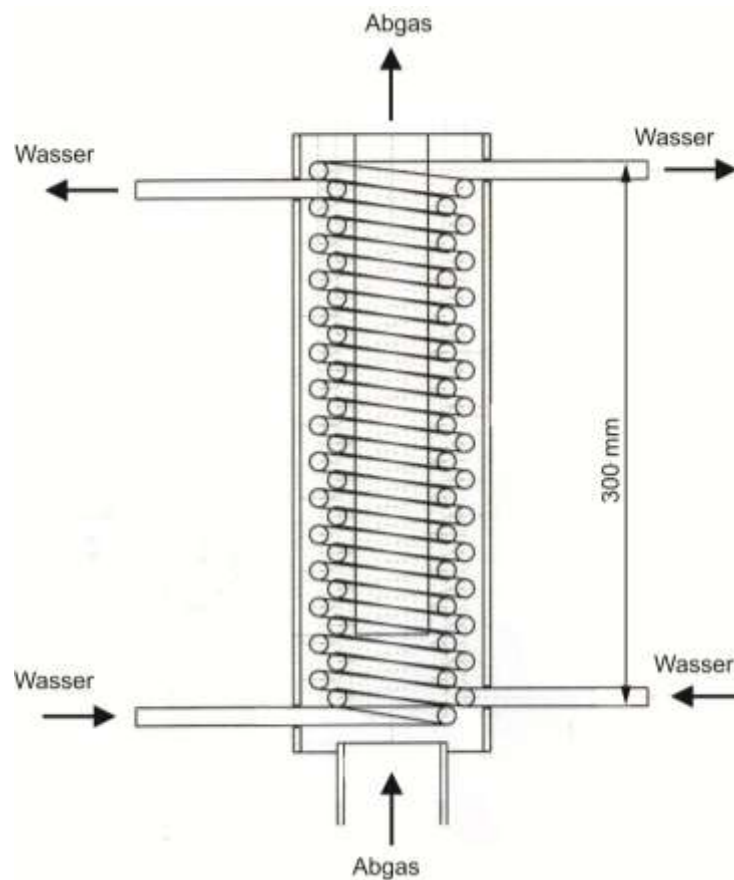
- Ausführung rund: Durchmesser innen: 108 mm, 159 mm, 168,3 mm
- Ausführung eckig: Innenabmessungen: 100 mm x 111,5 mm

Um die Abgase entlang der Rohrwendeln zu zwingen, wurde ein Dorn eingehängt. Der Durchmesser des Dorns beträgt 40 mm, und die Länge wurde variiert. Hierdurch entsteht eine Spaltbreite von 5 mm zwischen der inneren Rohrwendel und dem Dorn.

Durch die verschiedenen Gehäuseabmessungen und ihre Ausführung mit / ohne Isolierung wurden zwischen der äußeren Rohrwendel und der inneren Begrenzung der Gehäuse unterschiedliche Spaltbreiten überprüft.

Hierbei führte das rechteckige Gehäuse mit der eingebrachten einlagigen Isolierung zu den besten Ergebnissen bezüglich der Wärmerückgewinnung.

Die **Abbildung 2-39** zeigt eine schematische Darstellung des Wärmeübertragers.



**Abbildung 2-39:** Rohrwendel-Wärmeübertrager

Variiert wurden in den Versuchen am Teststand des GWI die folgenden Parameter:

- Kupfer/Edelstahl - Material der Wendeln
- rundes/eckiges - Gehäuse
- mit/ohne - Isolation des Gehäuses
- mit/ohne - Nanobeschichtung
- innenliegend/außerhalb - Länge des Dorns bzw. Position der Spitze des Dorns

## 2.9 Spezifikation der Geometrie am GWI für die Langzeittest

Im diesem Kapitel werden die Spezifikation der neuen Geometrie für die lang angelegten Testläufe an realen Anlagen fixiert. Desgleichen sollte die Analyse der Geometrie und der möglichen Beschichtung in Bezug auf eine optimale Beschichtung betrachtet werden. Am Ende der Versuche am GWI (**Kapitel 2.9.1**) soll die Auswahl der Geometrie für die Feldtests stehen.

### 2.9.1 Ergebnisse des neuen Wärmetauscher am Versuchsstand des GWI

Die Versuche am GWI mit der neuen Wärmetauschergeometrie wurden mit denselben Randbedingungen durchgeführt, wie die in **Kapitel 2.1** beschriebenen. Dabei wurde immer nur einer der am Ende des vorhergehenden **Kapitels 2.8** angeführten Parameter verändert und die Auswirkung analysiert.

Als erstes wurde das Material der Rohwendeln variiert, um den Beweis zu erbringen, dass die erwünschte Leistung des Wärmetauschers mit den Edelstahlrohrwendeln realisiert werden kann. Die Ergebnisse des Vergleiches sind in **Tabelle 2-5** dargestellt. Das Ergebnis zeigt, dass die gewünschte Wärmetauscherleistung nicht nur erbracht, sondern um mehr als das 2,5-fache gesteigert werden kann. Die Temperaturerhöhung des Wassers lag beim ursprünglichen Wärmetauscher bei ca. 6 °C, während mit der neuen Geometrie ca. 17 °C erreicht werden können. Zudem macht es ergebnistechnisch keinen Unterschied, welches Material für die Wendeln benutzt wird, sodass für die weiteren Versuche Edelstahlwendeln eingesetzt wurden.

**Tabelle 2-5:** Parameter: Material der Rohwendeln – Edelstahl und Kupfer

| Gehäuseform/Art                    | Rohrwendelmaterial | $\Delta T$ Wasser [°C] | $\Delta T$ Luft [°C] |
|------------------------------------|--------------------|------------------------|----------------------|
| Viereckiges Gehäuse ohne Isolation | Edelstahl          | 17,42                  | 258,06               |
| Viereckiges Gehäuse ohne Isolation | Kupfer             | 16,33                  | 259,87               |

Bei den ersten Versuchen wurde festgestellt, dass die Außenseite des Gehäuses sehr heiß wird. Aus Gründen der Sicherheit bei Berührung und um mehr Temperatur im Wärmetauscher zu behalten, wurde an der Innenseite des Gehäuses eine 5 mm starke thermoresistente Isolierung angebracht. Diese Isolierung reduzierte die Temperatur auf der Außenseite des Gehäuses in großen Teilen bis zu 100 °C. Im Einlauf veränderte sich die Temperatur erwartungsgemäß nicht wirklich, während in den restlichen Bereichen die Temperaturen auf der Oberfläche sich von 200 °C auf 100 °C verringerten. Als Beweis für die Oberflächentemperaturreduzierung werden in den beiden folgenden **Abbildung 2-40** und **Abbildung 2-41** eine Realbild- und eine Thermographie-Aufnahme angeführt, welche die relativ kühle Temperaturverteilung auf der Oberfläche des Wärmetauschers mit der Isolierung aufzeigen.

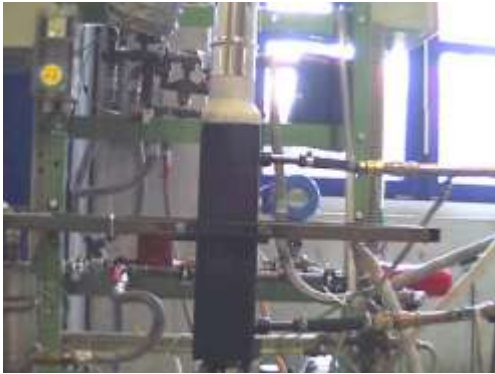


Abbildung 2-40: Realbildaufnahme

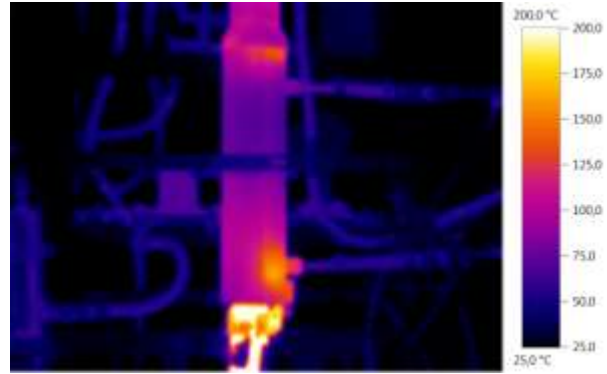


Abbildung 2-41: Thermographie Aufnahme

Dass sich die Temperaturerhöhung des Wassers (Tabelle 2-6) dadurch ein wenig reduzierte, wurde von den Projektpartnern unter dem Gesichtspunkt der gewonnenen Sicherheit bei versehentlichem Berühren akzeptiert.

Tabelle 2-6: Parameter: Isolation des Gehäuses – Ohne und Mit

| Gehäuseform/Art                    | Rohrwendel Material | $\Delta T$ Wasser [°C] | $\Delta T$ Luft [°C] |
|------------------------------------|---------------------|------------------------|----------------------|
| Viereckiges Gehäuse ohne Isolation | Edelstahl           | 17,42                  | 258,06               |
| Viereckiges Gehäuse mit Isolation  | Edelstahl           | 14,77                  | 248,62               |

Im Anschluss daran wurde die Gehäuseform untersucht. Dabei wurde die auch beim ursprünglichen Wärmeübertrager eingesetzte viereckige Form mit einer wie im Vorschlag dargestellten runden Form verglichen. Das in Tabelle 2-7 wiedergegebene Ergebnis zeigt, dass die viereckige Form keinen Nachteil gegenüber der runden hat. Daher entschied man sich, aufgrund der schon bei der Firma Runkel vorhandenen Fertigung, für die viereckigen Gehäuse und die weiteren Messungen mit dieser Gehäuseform fortzuführen.

Tabelle 2-7: Parameter: Gehäuseform – Viereckig und Rund

| Gehäuseform/Art                   | Rohrwendel Material | $\Delta T$ Wasser [°C] | $\Delta T$ Luft [°C] |
|-----------------------------------|---------------------|------------------------|----------------------|
| Viereckiges Gehäuse mit Isolation | Edelstahl           | 14,77                  | 248,62               |
| Rundes Gehäuse mit Isolation      | Edelstahl           | 13,97                  | 244,85               |

Nachdem die grundlegenden Parameter entschieden waren, wurden die ersten mit SiO<sub>2</sub> nanobeschichteten Wärmetauscher untersucht. Tabelle 2-8 zeigt, dass kaum ein Unterschied in den Ergebnissen der Messungen mit und ohne Nanobeschichtung auf den Edelstahlwendeln auftritt. Die Differenz in der Temperaturerhöhung des Wassers ist vernachlässigbar gering, sodass dem Einsatz nichts entgegensteht.

Tabelle 2-8: Parameter: Nanobeschichtung – Ohne und Mit

| Gehäuseform/Art                   | Rohrwendel Material | $\Delta T$ Wasser [°C] | $\Delta T$ Luft [°C] |
|-----------------------------------|---------------------|------------------------|----------------------|
| Viereckiges Gehäuse mit Isolation | Edelstahl           | 14,77                  | 248,62               |
| Viereckiges Gehäuse mit Isolation | Edelstahl mit Nano  | 14,20                  | 256,80               |

Zuletzt wurde noch einen Parameter betrachtet, welcher auf einer Vermutung des GWI basierte. Die Vermutung war, dass wenn die Spitze des Dornes in der Mitte des Wärmetau-



Seite 41 des Abschlussberichts zu „Innovative Nano-Beschichtung von Abgaswärmetauschern zur Steigerung der Effizienz und Lebensdauer“ unter der ZIM-Koop-Projekt-Nr.: KF3016101ST2 und KF2517704ST2

schers zu weit nach unten herausragt (tiefer als die Wendeln), dass dann ein größerer Teil der Luft nach unten/außen umgelenkt werden könnte und somit die Leistung des Wärmetauschers reduziert wird. Dies wurde durch die Ergebnisse der Messungen in **Tabelle 2-9** bestätigt. Die Spitze des Dorns sollte leicht zurückversetzt bzw. innerhalb der Rohrwendeln liegen.

**Tabelle 2-9:** Parameter: Position der Dornspitze - Innenliegend/Außerhalb

| Gehäuseform/Art                                                      | Rohrwendel Material | $\Delta T$ Wasser [°C] | $\Delta T$ Luft [°C] |
|----------------------------------------------------------------------|---------------------|------------------------|----------------------|
| Viereckiges Gehäuse mit Isolation - Dornspitze innerhalb der Wendeln | Edelstahl mit Nano  | 14,20                  | 256,80               |
| Viereckiges Gehäuse mit Isolation - Dornspitze außerhalb der Wendeln | Edelstahl mit Nano  | 11,20                  | 254,63               |

Die für die Langzeittests festgelegte Geometrie besteht somit aus einem Wärmetauscher mit Edelstahlwendeln (beschichtet und unbeschichtet) in einem viereckigen Gehäuse mit einer Isolation auf der Innenseite des Gehäuses und einem Dorn, dessen Spitze leicht zurückversetzt zwischen den Rohrwendeln liegt. Die folgende **Abbildung 2-42** und **Abbildung 2-43** zeigen beispielhaft den realen Aufbau des neuen Wärmeübertragers für heißes Rauchgas, wobei eine Hälfte des Gehäuses für die bessere Darstellung der Bilder entfernt wurde.



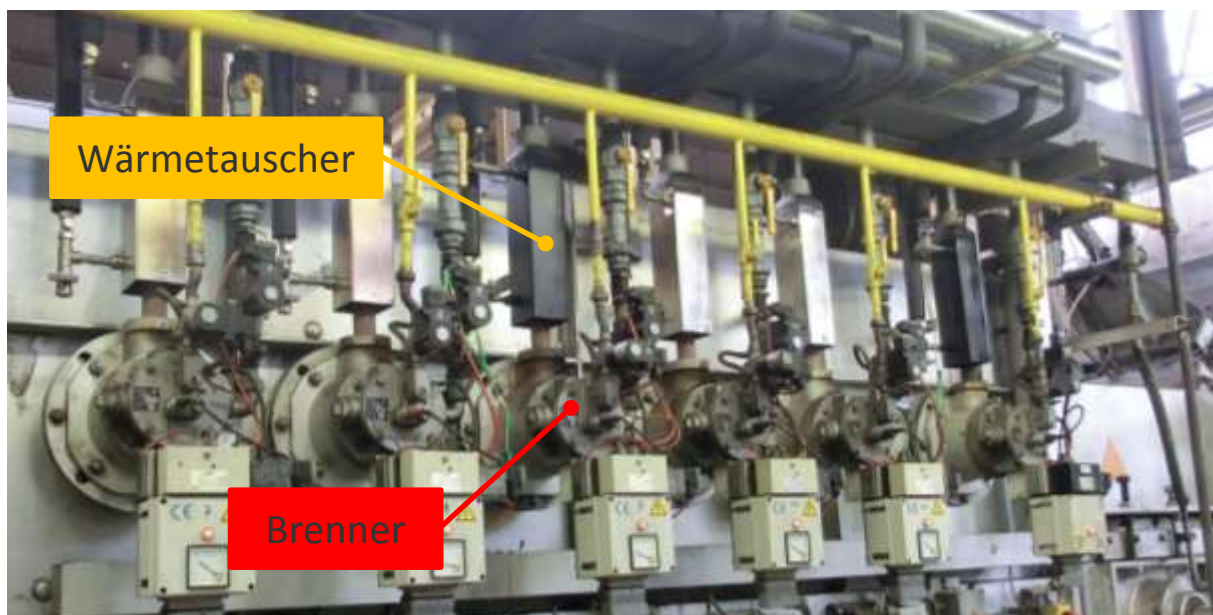
**Abbildung 2-42:** Neuer WT mit Dorn eingebaut



**Abbildung 2-43:** Neuer WT- Dorn extra

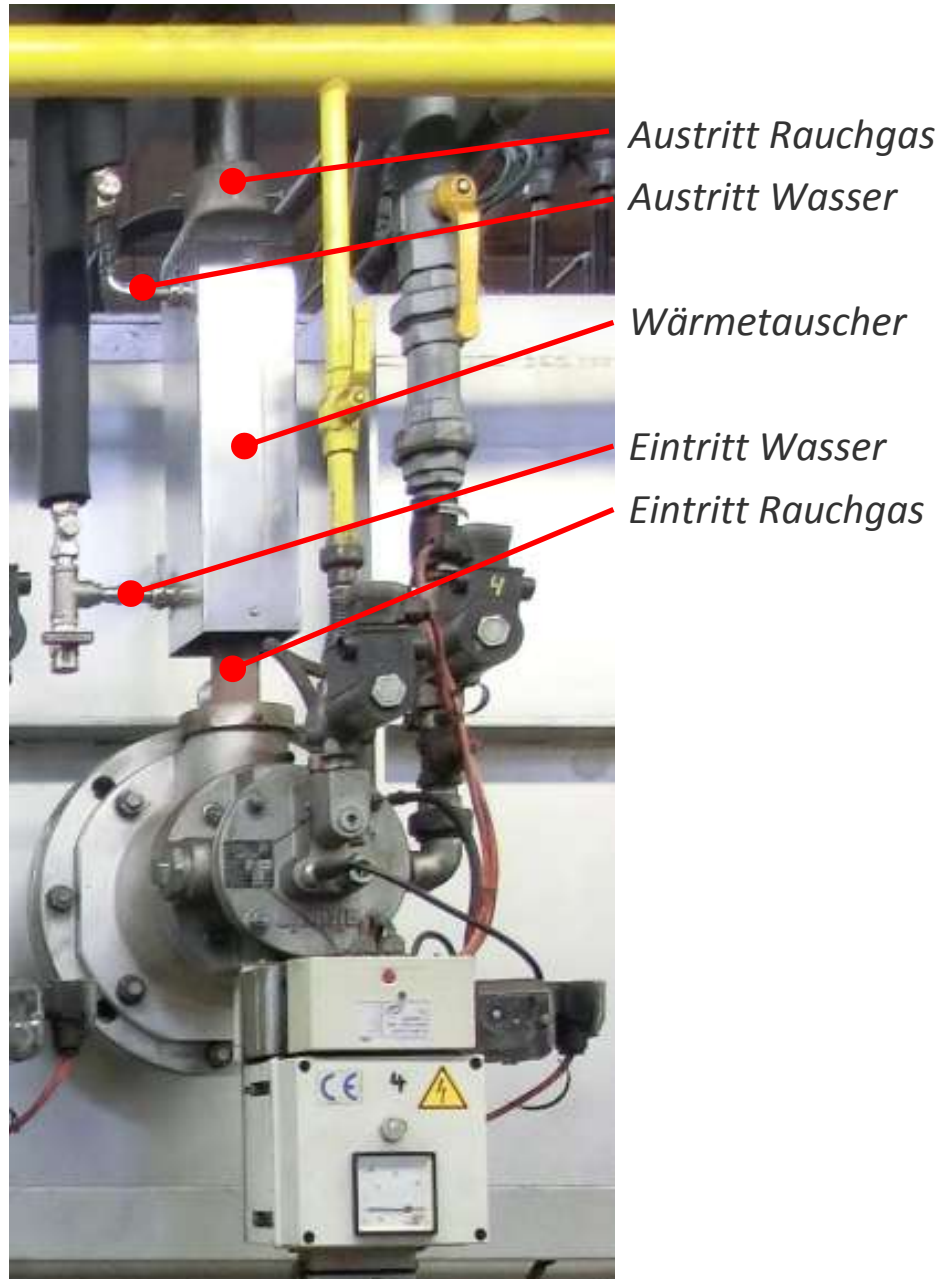
## 2.9.2 Aufbau Langzeittest beim Kunden

Zur Durchführung von Langzeitversuchen wurden die Wärmetauscher in einer Industrieofenanlage installiert. Die Ofenanlage verfügt über mehrere Strahlrohrbrenner, die mit Erdgas und Luft betrieben werden. Durch die Ausführung als Strahlrohrbrenner befindet sich der Rauchgasaustritt jeweils direkt am Brenner. In der Industrieofenanlage sind insgesamt neun Wärmetauscher verbaut, von denen drei mit einer Nano-Beschichtung ausgestattet worden sind. Die **Abbildung 2-44** zeigt eine fotografische Aufnahme der ersten Ofenhälfte. Die Wärmetauscher befinden sich jeweils oberhalb der Brenner. Zwei der sechs Wärmetauscher wurden für thermografische Aufnahmen schwarz lackiert, um Reflexionen auf der metallischen Oberfläche zu reduzieren.



**Abbildung 2-44:** Einbausituation am Industrieofen

Die **Abbildung 2-45** zeigt den Einbau eines Wärmetauschers. Gasseitig ist der Wärmetauscher direkt mit der Rauchgasführung des Strahlrohrbrenners verbunden. Das heiße Rauchgas durchströmt den Wärmetauscher und wird im Anschluss in die Rauchgassammelleitung der Industrieanlage geführt. Durch die kompakte Bauart ersetzt der Wärmetauscher nur ein kurzes Stück der Rohrleitung in der Rauchgasführung. Die beiden seitlichen Anschlüsse des Wärmetauschers dienen als Vor- und Rücklauf des Warmwasserkreislaufs der Gesamtanlage. Wie auch in den experimentellen Versuchen werden die Medien (Rauchgas und Wasser) im Gleichstrom durch den Wärmetauscher geführt. Drei der installierten Wärmetauscher sind zur Erfassung der wasserseitigen Temperaturen mit Thermoelementen ausgestattet. Rauchgasseitig sind zudem Messbohrungen am Eintritt und Austritt vorhanden.



**Abbildung 2-45:** Versuchsaufbau für Langzeitversuche

### 2.9.3 Ergebnisse Langzeittest

Die ersten Ergebnisse des Langzeittests beim Kunden sind sehr positiv. In der nachfolgenden **Tabelle 2-10** werden die Ergebnisse für die 3 mit Thermoelementen ausgestatteten Wärmetauscher dargestellt. Die eingestellten Parameter der Brenner und verbauten Wärmetauscher waren:

- Leistung der Brenner: 32 kW
- Lambda: 1,1
- Volumenstrom des Rauchgases: 37 m<sup>3</sup><sub>N</sub>/h
- Volumenstrom des Wassers: 4,4 l/min

**Tabelle 2-10:** Ergebnisse der ersten Messungen bei den Langzeittests

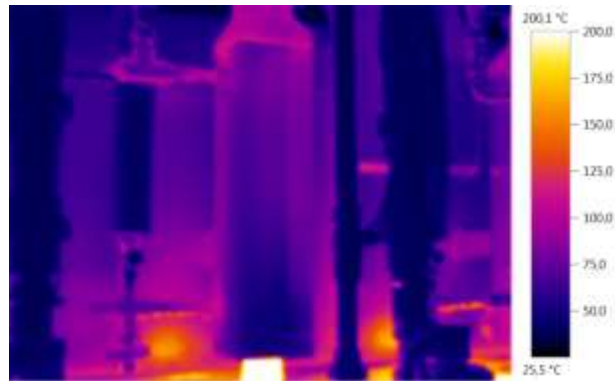
| Wärmetauscher     | Wasser, Ein [°C] | Wasser, Aus [°C] | Rauchgas Ein [°C] | Rauchgas Aus [°C] | Wasser $\Delta T$ [°C] | Rauchgas $\Delta T$ [°C] |
|-------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|------------------------|--------------------------|
| Wärmeübertrager 1 | 102,3            | 113,0            | 510,2             | 166,3             | 10,7                   | 343,9                    |
| Wärmeübertrager 2 | 102,2            | 119,1            | 573,4             | 193,4             | 17,0                   | 380,0                    |
| Wärmeübertrager 3 | 104,4            | 117,1            | 520,6             | 167,7             | 12,7                   | 352,9                    |

Die Wärmeübertrager 1 und 2 waren unbeschichtet und Wärmeübertrager 3 beschichtet. Es lässt sich kein Einfluss auf die Wärmeübertragung bei den Messungen erkennen.

Die dabei gemessenen Oberflächentemperaturen der Gehäuse der Wärmetauscher lagen weit unter 100 °C. Die nachfolgenden **Abbildung 2-46** bis **Abbildung 2-47** verdeutlichen dies durch Thermografieaufnahmen. In **Abbildung 2-46** ist einer der für die Messungen vorbereiteten Wärmetauscher im Realbild zu sehen. **Abbildung 2-47** zeigt denselben Wärmetauscher in der Thermographieaufnahme.



**Abbildung 2-46:** Realbild WT am Industrieofen



**Abbildung 2-47:** Thermobild WT am Industrieofen



**Abbildung 2-48** zeigt einen unbeschichteten und **Abbildung 2-49** den nanobeschichteten Wärmeüberträger. Wie aus den Bildern ersichtlich, sind beide Wärmeübertrager verschmutzt, allerdings weist der unbeschichtete WT eine wesentlich stärkere Verschmutzung auf. Durch die  $\text{SiO}_2$ -Beschichtung sind die Metallatome des Wärmeübertragers gesättigt und nicht mehr in der Lage, neue Atome aufzunehmen Infolge dessen haften die Schmutzpartikel nur oberflächlich auf dem nanobeschichteten Wärmetauscher Die Schmutzpartikel lassen sich bei der Wartung ganz leicht von der Oberfläche waschen. Beim unbeschichteten WT verschmutzt die Oberfläche immer mehr. Die Reinigung erfordert einen hohen Aufwand.



**Abbildung 2-48:** unbeschichteter WT



**Abbildung 2-49:** nanobeschichteter WT

#### **2.9.4 Designkriterien**

Wenn man über die Designkriterien für diese Art der Anwendung von Wärmetauschern spricht, sollte der primäre Parameter die allgemeine Robustheit des Produktes gegenüber dem Anwendungsfall sein und erst im Anschluss daran die weiteren Eigenschaften untersuchen und anpassen. Eine gute Hilfe für das Design und die Auslegung ist weiterhin das auch in diesem Projekt genutzte Werkzeug der CFD-Simulationen parallel zu den experimentellen Untersuchungen.

Bei der Auswahl der weiteren Designkriterien war entscheidend, einen Wärmeübertrager zu bauen, der die Ansprüche in Verbindung mit dem Raummangel, gewissen Verfahrungsbedingungen, spezifischen Leistung ( $\text{kW/m}^3$ ) für einen Temperaturunterschied zwischen den Medien und geringfügige Kosten erfüllt. Ein kompakter Wärmetauscher mit zwei Wendelkanälen ist für diese Aufgaben geeignet, da eine maximale Rohroberfläche zur Verfügung steht und somit der Wärmeübertragungskoeffizient  $\alpha$  besonders hoch ist. Bei der Umsetzung des Wärmeübertragers in zylindrischer Bauart konnten die einzelnen Windungen mit einem geringeren Biegeradius gewickelt werden. Hierbei wurde der Bauraum für den Wärmeübertrager möglichst gering gehalten.

Auf das konkrete Projekt bezogen, wurden folgende Gesichtspunkte bei der Gestaltung der Abgaswärmetauscher umgesetzt:

##### **Leichte Montage an den vorhandenen Strahlrohrbrennern:**

- Die meisten Strahlrohrbrenner wurden an einem senkrecht verlaufenden Abgasrohr angeschlossen, die Nennweite beträgt: 2“, d. h. 60,3 mm Außendurchmesser.
- Die Abmessungen des Abgaswärmetauschers bzw. seines Gehäuses wurden so klein gewählt, um die geringen Platzverhältnisse an den Strahlrohrbrenneranlagen bestmöglich auszunutzen.
- Befestigung des Abgaswärmetauschers an einer stabilen Rohrschelle, die an das vorhandene Abgasrohr des Strahlrohrbrenners geschraubt wurde.
- Die gegossene Abgashaube wurde über das genormte Abgasrohr geschoben und mit einer Schraube fixiert.
- Der Abgaswärmetauscher ersetzte somit nur ein Teilstück der vorhandenen senkrechten Abgasleitung.

##### **Leichte Zugänglichkeit zu den Wärmetauscherrohrwendeln zur Inspektion und Reinigung:**

- Das zweiteilige Gehäuse lässt sich einfach demontieren.
- Die Vor- und Rücklaufanschlüsse der Rohrwendeln sind zu einer Seite aus dem Gehäuse geführt.
- Ohne Ausbau des Wärmetauschers lässt sich das Innere des Gehäuses inspizieren und ggf. reinigen.



Seite 47 des Abschlussberichts zu „Innovative Nano-Beschichtung von Abgaswärmetauschern zur Steigerung der Effizienz und Lebensdauer“ unter der ZIM-Koop-Projekt-Nr.: KF3016101ST2 und KF2517704ST2

**Sicherer Betrieb der Anlage und Verhinderung der Gefährdung von Mitarbeitern:**

- Ausführung des Abgaswärmetauschers mit einem Zugunterbrecher im Anschlussrohr. Dadurch wird eine Beeinflussung der Brenneinstellungen und der Druckverhältnisse im Strahlrohr verhindert.

**Schutz vor Verbrennung bei versehentlichem Berühren des Gehäuses:**

- Durch die Ausstattung des Gehäuses mit einer 5 mm starken thermoresistenten Isolierung an der Innenseite ist das Gehäuse an der Außenseite relativ kühl.

### **3. Haben sich die Aussichten für die Erreichung der Projektziele oder die Zielsetzungen innerhalb des angegebenen Berichtszeitraums gegenüber dem Antrag geändert?**

**Ja!**

Die Projektpartner sind zum Zeitpunkt der Zwischenberichterstellung (Meilenstein 1) durch die Ergebnisse der Arbeitspunkte 1.1 bis 2.4 einvernehmlich zu dem Ergebnis gekommen, dass sich die Randbedingungen für das Projekt definitiv geändert haben.

Die Problematik der verschmutzten Wärmetauscher in diesem einen Fall, welche immer wieder Probleme und Ausfälle produziert haben, resultiert mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit aus einem Wasserschaden und nicht aus einem Angriff aus der Abgasphase. Dieser scheint durch die Überhitzung des Wasser direkt hinter der Stirnseite am Wärmetauscher zu entstehen. Deshalb können Risse an der Stirnseite auftreten, durch welche Wasser in den heißen Abgasstrom gelangt, dort direkt verdampft und die Feststoffe als Ablagerung zurückbleiben. Die Risse könnten auf zwei verschiedene Arten entstehen. Entweder durch Implosionen von Gasblasen (Erosion/Abrasion) an der Innenseite des Wärmetauschers, welche die Flächen förmlich abräsen und eventuell durchbrechen, oder Spannungen im Material durch Temperaturschwankungen könnten Spannungsrisse erzeugen. Dabei verschmutzt der Wärmetauscher durch die Ablagerungen bzw. Beläge in eben dieser Weise.

Daher wurde zu diesem Zeitpunkt einstimmig von den Projektpartnern beschlossen, den weiteren Verlauf und die Abarbeitung der nachfolgenden Arbeitspakete zwischenzeitlich an dieser Stelle zu stoppen.

Um das eigentliche Projektziel einer „Effizienz- und Lebensdauersteigerung“ der Wärmeübertragung mittels Edelstahlwärmetauscher trotzdem zu erreichen, wurde dies mit der Förderstelle kommuniziert. Dem Fördergeber wurden von den Projektpartnern ein neuer möglicher Lösungsweg und die Weiterführung des Projektes mit angepassten Zielen und Arbeitsumfang vorgeschlagen.

Dieser Lösungsweg wurde durch den Fördermittelgeber akzeptiert und durch die Projektpartner umgesetzt.

#### **4. Anpassung des Projektzieles und des Arbeitsplanes**

Der geänderte Ablauf des Projektes wird nachfolgend kurz skizziert und die Chancen des neuen Produktes am Markt aufgezeigt.

Eine mögliche alternative Geometrie wurde bereits im **Kapitel 2.7** vorgestellt. Durch weitere experimentelle Untersuchungen sollte die neue Geometrieform mit verschiedenen Einbausituationen untersucht werden, um eine für die vorliegende Anwendung optimierte WT-Geometrie zu finden. Diese verbesserte Geometrie sollte dann auf die Nanobeschichtung vorbereitet und die Nanobeschichtung auf die geänderte Geometrie angepasst werden. Das Ziel der Lebensdauererlängerung der Wärmetauscher durch Nanotechnologie wurde somit weiter verfolgt. Bei der originalen Geometrie scheiterte eine Wärmerückgewinnung an der Beschädigung des Wärmetauschers. In dem geplanten Langzeittest wird durch den direkten Vergleich von beschichteten und unbeschichteten Wärmetauschern unter realen Bedingungen und eine anschließende Materialanalyse, auf der einen Seite die Effizienzsteigerung (verbesserte Wärmeübertragung) und auf der andern Seite die Lebensdauererhöhung, untersucht.

Die im Antrag formulierte, geplante technologische Entwicklung - die Erarbeitung einer Beschichtungsstrategie mit Hilfe der Nanotechnologie für Edelstahlwärmetauscher im Hochtemperaturbereich von 500 – 600 °C für den Einsatz in aggressiven Medien – soll auf jeden Fall erbracht werden. Zahlreiche Bauteile, gerade auch zur Wärmerückgewinnung, sind generell in ihrer Lebensdauer durch die beschriebenen Anwendungen begrenzt. Aggressive Medien finden sich in zahlreichen Industrieanwendungen.

Der im Antrag dargelegte Arbeitsplan kann nach Meinung der Partner trotz geänderter Voraussetzungen weiterverfolgt werden, da eine Nanobeschichtung für Edelstahlwärmetauscher zurzeit nicht am Markt verfügbar ist.

Auf der nachfolgenden Seite ist in **Abbildung 4-1** der angepasste Arbeitsplan dargestellt.

| Arbeitsschritte |                                               | 1.Jahr |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 2.Jahr |    |    |    |    |    |
|-----------------|-----------------------------------------------|--------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|--------|----|----|----|----|----|
|                 |                                               | 1      | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13     | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| 1.1             | Messtechnische Erfassung                      | ★      |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |        |    |    |    |    |    |
| 1.2             | Analyse der Ablagerungen                      |        |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |        |    |    |    |    |    |
| 1.3             | Analyse der Gaszusammensetzung                |        |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |        |    |    |    |    |    |
| 2.1             | Analyse der Geometrie                         |        |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |        |    |    |    |    |    |
| 2.2             | Simulation von Alternativvarianten            |        |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |        |    |    |    |    |    |
| 2.3             | Nanotechnologie                               |        |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |        |    |    |    |    |    |
| 2.4             | Spezifikation der Geometrieviation            |        |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |        |    |    |    |    |    |
| 3.1             | Variation und Optimierung der Geometrie       |        |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |        |    |    |    |    |    |
| 3.2             | Variation der Parameter der Nano-Beschichtung |        |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |        |    |    |    |    |    |
| 3.3             | Langzeittest/Feldtest                         |        |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |        |    |    |    |    |    |
| 3.4             | Analyse der Messdaten                         |        |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |        |    |    |    |    |    |
| 4.1             | Auswertung der Tests                          |        |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |        |    |    |    |    |    |
| 4.2             | Aufstellen von Designkriterien                |        |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |        |    |    |    |    |    |
| 4.3             | Erstellung der Dokumentation                  |        |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |        |    |    |    |    |    |

- ★ geplante Meetings
- ★ Kick-off-Meeting
- ★ Zwischenmeetings
- ★ Abschlussmeeting

**Abbildung 4-1:** Arbeitsplan nach Projektzielanpassung und Verlängerung

## 5. Gegenüberstellung von Forschungszielen und erzielten Ergebnissen

|                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Messtechnische Erfassung des Wärmetauschers</li> </ul>           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Komplette messtechnische Erfassung wurde durchgeführt</li> </ul>                                                                                         |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Analyse der Ablagerungen</li> </ul>                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Analysen der korrosiven Ablagerungen wurden durchgeführt</li> </ul>                                                                                      |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Analyse der Gaszusammensetzung</li> </ul>                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wurde nicht durchgeführt, da keine Daten zur Verfügung standen, dafür wurde eine metallurgische Untersuchung des Wärmeübertragers vollzogen</li> </ul>   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Simulation des Wärmetauschers und Alternativvarianten</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Simulationen des Wärmetauschers unter verschiedenen Einsatzbedingungen wurden durchgeführt, analysiert und mit den Messergebnissen verglichen</li> </ul> |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nanotechnologie und Beschichtung</li> </ul>                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Die SiO<sub>2</sub>-Beschichtung der Edelstahl-Wärmetauscher wurde durch die Wieland Werke ausgeführt und variiert</li> </ul>                            |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Analyse der Geometrie</li> </ul>                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Die ursprüngliche Geometrie war so nicht für den Einsatzzweck geeignet</li> </ul>                                                                        |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Spezifikation der Geometrievariationen</li> </ul>                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Neues, modifiziertes Konzept für den Edelstahlwärmetauscher erstellt, gebaut und umgesetzt</li> </ul>                                                    |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Variation und Optimierung der Geometrie</li> </ul>               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Variation von Parametern des neuen Wärmetauschers</li> </ul>                                                                                             |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Variation der Parameter für die Nanobeschichtung</li> </ul>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• erste Variante wurde im Langzeittest untersucht</li> </ul>                                                                                               |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Langzeittest/Feldtest</li> </ul>                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Durchführung und Umsetzung der Versuchsreihen unter Produktionsbedingungen in einem Härterei-betrieb</li> </ul>                                          |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Analyse der Messdaten</li> </ul>                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• erste Messdaten erfasst</li> </ul>                                                                                                                       |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Auswertung der Tests</li> </ul>                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• wurde durchgeführt</li> </ul>                                                                                                                            |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufstellung Designkriterien</li> </ul>                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Designkriterien erstellt</li> </ul>                                                                                                                      |

|                |                                     |                                                                                         |
|----------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Meilenstein 1: | <input checked="" type="checkbox"/> | Spezifikation Wärmetauscher Geometrie und Parameter für die Nanobeschichtung festgelegt |
| Meilenstein 2  | <input checked="" type="checkbox"/> | Analyse der Langzeittests - wurde durchgeführt                                          |
| Meilenstein 3  | <input checked="" type="checkbox"/> | Aufstellung Designkriterien - wurde durchgeführt                                        |

## 6. Nutzen der Forschungsergebnisse und Marktchancen

Auf Grund folgender Aspekte, wie den

- gesetzlichen Energieeinsparverordnungen und Emissionsgesetzen
- betrieblichen Forderungen zur Energieeinsparung und
- finanziellen Einsparungen

sieht die Firma Runkel GmbH & Co. KG große Marktchancen für die beschichteten Abgaswärmetauscher. Durch den Einbau des neu entwickelten Abgaswärmetauschers wird z. B. eine bisher elektrisch beheizte Waschmaschine mit Warmwasser versorgt, welches unter zur Zuhilfenahme der heißen Abgase der Strahlrohrbrenner erwärmt wird. Hierbei werden geringe Kapitalrückflusszeiten von ca. 2 - 3 Jahren erreicht. Zusätzlich führen weiterhin steigende Energiekosten zum wirtschaftlichen Umdenken, nicht nur energieeffizienter zu produzieren, sondern auch ungenutzte freigesetzte Energie in den Produktionsprozess zurückzuführen, um finanzielle Einsparungen zu erreichen und gleichzeitig Emissionen (CO<sub>2</sub>) zu verringern.

Hierdurch wird ein Beitrag zum Umweltschutz geleistet.

### 6.1 Auswirkungen auf das Unternehmen Runkel

Die stetige Verringerung des Energieverbrauchs von Thermoprozessanlagen führt dazu, dass Wärmerückgewinnungsanlagen zukünftig im stärkeren Maß in zahlreichen Produktionsabläufen der Industrie eingesetzt werden müssen. Eine wichtige Komponente bei der Wärmerückgewinnung ist der Wärmetauscher, schon heute sind viele der bereits bestehenden deutschen aber auch ausländischen Industriekunden der Firma Runkel bereit, bei erfolgreicher Konstruktion der Wärmetauscher, das neue Produkt zu kaufen. Runkel kann dadurch bestehende Märkte im Bereich der Wärmerückgewinnung aus Abgasen in der Industrie sichern aber auch neue Absatzmärkte schaffen. Durch den Absatz der neuen Technologie wird eine Umsatzsteigerung langfristig von ca. 10 % angestrebt. Der Standort Deutschland und speziell der Standort von Runkel in Wuppertal kann so weiter ausgebaut, bestehende Arbeitsplätze können gesichert und neue Arbeitsstellen zukünftig geschaffen werden. Diese Aspekte helfen dem Unternehmen bei der Entwicklung neuer, innovativer Systemlösungen bei kundenspezifischen Projekten ihre Erfahrungen aus diesem Projekt mit einbringen. Der Technologieansatz im Rahmen des Projektes besteht auf der Beschichtung von Edelstahlwärmetauschern nach dem Verfahren der Gasphasenabscheidung (CVD). Die Gasphasenabscheidung ist ein gängiges Verfahren in der Nanotechnologie. Dabei sind die Potentiale in der Forschung und Entwicklung neuer Beschichtungssysteme und ihre Anwendungsmöglichkeiten noch lange nicht ausgeschöpft. Runkel verfügt über jahrzehntelange Erfahrung in Forschung, Entwicklung und Herstellung von innovativen Produkten und Materialien mit ihren Anwendungen für die industrielle Thermoprozessoptimierung. Die Nutzung einer neuen Beschichtung für Edelstahl stellt für Runkel eine neue technologische Herausforderung dar. Ziel ist es langlebige Wärmeübertragungssysteme für den Einsatz im Hochtemperaturbereich in



Seite 53 des Abschlussberichts zu „Innovative Nano-Beschichtung von Abgaswärmetauschern zur Steigerung der Effizienz und Lebensdauer“ unter der ZIM-Koop-Projekt-Nr.: KF3016101ST2 und KF2517704ST2

aggressiven Medien zu entwickeln. Die Realisierung des Entwicklungsvorhabens wird nicht nur die Wettbewerbsfähigkeit von Runkel stärken, sondern auch den größtmöglichen Beitrag zur regionalen Entwicklung auf dem Gebiet der Wärmerückgewinnung leisten.

Mit fortschreitendem Projektverlauf werden Maßnahmen zur Markteinführung gezielt vorbereitet, dabei soll der Wärmetauscher im Direktvertrieb angeboten werden. Das Werbeziel heißt, Steigerung des Bekanntheitsgrads, langfristige Kundenbindung, Neukundengewinnung und Imageaufbesserung. Hierfür sind Anpassung der Homepage, Publikationen, Präsentationen, Messeauftritte, Kundenakquisition, Dienstleistungsaufbau und weiteres geplant.

## **6.2 Marktchancen für den neuen Wärmeübertrager**

Das zu erwartende Marktpotential bei Herstellern von Wärmetauschern in Deutschland liegt jedes Jahr bei ca. 10 - 15 Tsd. Wärmetauschern dieser Art. Der neue modifizierte Wärmetauscher hebt sich durch Nutzensvorteile wie leichte Handhabung, Langlebigkeit, geringe Wartungsintervalle und schnelle Amortisation von den anderen Produkten der Konkurrenz ab. Durch die neue Beschichtung mit nanoskopischer Struktur können die Standzeiten der Wärmetauscher im Hochtemperaturbereich möglicherweise um das ca. 15- bis 20-fache gesteigert werden. Das neue Design ermöglicht eine leichte Handhabung bei der eventuell nötigen Reinigung und ist nahezu wartungsfrei. Der Wärmetauscher kann kostengünstig hergestellt und dementsprechend zu einem günstigen Preis angeboten werden. Ein klarer Wettbewerbsvorteil gegenüber anderen Herstellern liegt in den wesentlich verbesserten Produkteigenschaften.

Aber nicht nur im Anwendungsbereich der Wärmerückgewinnung liegt das Verkaufspotential. Ziel ist es, mit der Entwicklung nanobeschichteter Edelstähle im Hochtemperaturbereich neue Märkte zu erschließen und zwar überall dort, wo die Anforderungen an einen Werkstoff bestehen, die Beständigkeit gegen Korrosion und Verschmutzung durch aggressive Medien zu verhindern. Beispiele dafür sind der Einsatz in der chemischen Industrie, aber auch im Automobilbereich, in der Heizungstechnik, im aufstrebenden Markt der Biogasanlagen oder in der Versorgungstechnik beim Einsatz von Edelstahlrohren.

## **7. Danksagung**

Wir danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) für die Förderung des ZIM-Projektes (KF3016101ST2 und KF2517704ST2) im Förderprogramm "Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM)- Fördermodul Kooperationsprojekte (KF)".

## 8. Abbildungsverzeichnis

|                                                                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 2-1: Projektzeitplan bei Antragsstellung.....                                                                                                                                        | 4  |
| Abbildung 2-2: Prinzip Strahlheizrohrbrenner .....                                                                                                                                             | 5  |
| Abbildung 2-3: Wärmetauscher .....                                                                                                                                                             | 5  |
| Abbildung 2-4: R + I-Schema einer Abgaswärmerückgewinnungsanlage an Strahlheizrohrbrennern.....                                                                                                | 6  |
| Abbildung 2-5: Schema des Versuchsstandes.....                                                                                                                                                 | 8  |
| Abbildung 2-6: Versuchsstandsaufbau am GWI.....                                                                                                                                                | 9  |
| Abbildung 2-7: Massen- und Volumenstrom in Abhängigkeit der Brennerleistung.....                                                                                                               | 10 |
| Abbildung 2-8: Position des Thermoelements an der Stirnseite des WT .....                                                                                                                      | 11 |
| Abbildung 2-9: Prinzipzeichnung der Einbauvarianten 1-4, in Rot die jeweiligen Änderungen .....                                                                                                | 12 |
| Abbildung 2-10: Simulierte Temperaturverteilung des Wassers an der Stirnseite des WT ....                                                                                                      | 13 |
| Abbildung 2-11: Sichtbare Ablagerungen an der Halterung (rechts) und den Böden (links) des WTs.....                                                                                            | 15 |
| Abbildung 2-12: Bereich1 (rote Markierung).....                                                                                                                                                | 15 |
| Abbildung 2-13: Bereich 2 und 3.....                                                                                                                                                           | 15 |
| Abbildung 2-14: Analysierte Ablagerungen Bereich 2 (Innenwand).....                                                                                                                            | 16 |
| Abbildung 2-15: Analysierte Ablagerungen Bereich 3 (Winglet-Kanäle) .....                                                                                                                      | 16 |
| Abbildung 2-16: Summenspektrum der gesamten analysierten Probenfläche aus Bereich 1                                                                                                            | 16 |
| Abbildung 2-17: Farblich dargestellte Elementverteilung von links oben nach rechts unten, Schwefel, Calcium, Silicium, Chlor, Kalium, Eisen, Nickel und Chrom des Bereiches 1 (Außenwand)..... | 17 |
| Abbildung 2-18: Summenspektrum der analysierten Ablagerung aus dem Bereich 2 (Innenwand) .....                                                                                                 | 18 |
| Abbildung 2-19: Summenspektrum der analysierten Ablagerung aus dem Bereich 3 (Winglet-Kanäle).....                                                                                             | 18 |
| Abbildung 2-20: Ablagerungen innen .....                                                                                                                                                       | 19 |
| Abbildung 2-21: Ablagerungen außen .....                                                                                                                                                       | 19 |
| Abbildung 2-22: Abgesägte Wärmetauscher-Böden mit Winglet-Kanälen .....                                                                                                                        | 22 |
| Abbildung 2-23: Korrodiertes und gerissenes Winglet-Kanal, Rissbildung unter der Schweißnaht.....                                                                                              | 22 |
| Abbildung 2-24: Vergrößerung der Rissbildung; interkristalline Kriechschädigungen .....                                                                                                        | 23 |
| Abbildung 2-25: Ausgeprägte Rissverzweigung und teilweise herausgebrochene Oberflächenbereiche.....                                                                                            | 23 |
| Abbildung 2-26: Verschiedene Ansichten des modellierten Wärmeübertragers.....                                                                                                                  | 24 |
| Abbildung 2-27: Stromlinien der heißen Luft (links), der Umgebungsluft (Mitte) und des Wassers (rechts) eingefärbt mit der Temperatur .....                                                    | 25 |
| Abbildung 2-28: Temperatur des Wassers an der Stirnseite des WT .....                                                                                                                          | 26 |
| Abbildung 2-29: Temperaturen in der Schnittebene .....                                                                                                                                         | 27 |

|                                                                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 2-30: Massenbilanz und Geschwindigkeitsvektoren der Luftströme für Ursprungszustand mit $p_{\text{Kamin}} = 0 \text{ Pa}$ .....                                           | 28 |
| Abbildung 2-31: Stromlinien der heißen Luft (links) und der Umgebungsluft (rechts) mit der Temperatur eingefärbt für Ursprungszustand mit $p_{\text{Kamin}} = -50 \text{ Pa}$ ..... | 29 |
| Abbildung 2-32: Massenbilanz und Geschwindigkeitsvektoren der Luftströme für den Ursprungszustand mit $p_{\text{Kamin}} = -50 \text{ Pa}$ .....                                     | 30 |
| Abbildung 2-33: Übertragene Wärmemenge und Wassertemperatur am Austritt als Funktion des anliegenden Unterdrucks im Kamin .....                                                     | 30 |
| Abbildung 2-34: Alternative Varianten .....                                                                                                                                         | 31 |
| Abbildung 2-35: Temperatur des Wassers an der Stirnseite für Variante 4 mit $p_{\text{Kamin}} = -50 \text{ Pa}$ .....                                                               | 32 |
| Abbildung 2-36: Wärmetauscher vor der Reinigung .....                                                                                                                               | 33 |
| Abbildung 2-37: Wärmetauscher nach der Reinigung .....                                                                                                                              | 34 |
| Abbildung 2-38: Säuretest in einer 25%igen Schwefelsäure .....                                                                                                                      | 35 |
| Abbildung 2-39: Rohrwendel-Wärmeübertrager.....                                                                                                                                     | 38 |
| Abbildung 2-40: Realbildaufnahme.....                                                                                                                                               | 40 |
| Abbildung 2-41: Thermographie Aufnahme .....                                                                                                                                        | 40 |
| Abbildung 2-42: Neuer WT mit Dorn eingebaut .....                                                                                                                                   | 41 |
| Abbildung 2-43: Neuer WT- Dorn extra .....                                                                                                                                          | 41 |
| Abbildung 2-44: Einbausituation am Industrieofen .....                                                                                                                              | 42 |
| Abbildung 2-45: Versuchsaufbau für Langzeitversuche.....                                                                                                                            | 43 |
| Abbildung 2-46: Realbild WT am Industrieofen .....                                                                                                                                  | 44 |
| Abbildung 2-47: Thermobild WT am Industrieofen .....                                                                                                                                | 44 |
| Abbildung 2-48: unbeschichteter WT .....                                                                                                                                            | 45 |
| Abbildung 2-49: nanobeschichteter WT .....                                                                                                                                          | 45 |
| Abbildung 4-1: Arbeitsplan nach Projektzielanpassung und Verlängerung.....                                                                                                          | 50 |

## 9. Tabellenverzeichnis

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 2-1: Messergebnisse Variante 1 .....                                   | 12 |
| Tabelle 2-2: Messergebnisse Variante 2 .....                                   | 13 |
| Tabelle 2-3: Messergebnisse Variante 3 .....                                   | 14 |
| Tabelle 2-4: Messergebnisse Variante 4 .....                                   | 14 |
| Tabelle 2-5: Parameter: Material der Rohrwendeln – Edelstahl und Kupfer .....  | 39 |
| Tabelle 2-6: Parameter: Isolation des Gehäuses – Ohne und Mit .....            | 40 |
| Tabelle 2-7: Parameter: Gehäuseform – Viereckig und Rund .....                 | 40 |
| Tabelle 2-8: Parameter: Nanobeschichtung – Ohne und Mit .....                  | 40 |
| Tabelle 2-9: Parameter: Position der Dornspitze - Innenliegend/Außerhalb ..... | 41 |
| Tabelle 2-10: Ergebnisse der ersten Messungen bei den Langzeittests .....      | 44 |